

Optimierung eines Versuchsaufbaus und Untersuchungen des
Materialabtrags für Laser-ablative Mikroantriebe

Jan Pastow

Masterarbeit

IFSW 16-06



Betreuer:

Daniel Förster, IFSW Stuttgart

Dr. rer. nat. Raoul-Amadeus Lorbeer, DLR Stuttgart

März 2016

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Ausführungen, die fremden Quellen wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, sind kenntlich gemacht. Die Arbeit war in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung. Das eingereichte elektronische Exemplar dieser Arbeit stimmt mit den gebundenen Exemplaren überein.

Stuttgart, den 1. März 2016

(Jan Pastow)

Aufgabenstellung Masterarbeit

für Herrn Jan Pastow

Betreuer-IFSW: Daniel Förster

Betreuer-DLR: Raoul-Amadeus Lorbeer

Beginn: 1.9.2015

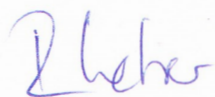
Optimierung eines Versuchsaufbaus und Untersuchungen des Materialabtrags für Laser-ablative Mikroantriebe

**Optimization of an experimental setup and investigations
on material removal for micro propulsion by laser induced ablation**

Zur hochgenauen Lageregelung von Satelliten und Satellitenkonstellationen wird am Institut für technische Physik des DLR Stuttgart das Konzept des laser-ablativen Mikroantriebs untersucht. Bei diesem Antrieb wird durch fokussierte, kurze Laserpulse Material von einer metallischen Oberfläche abgetragen mit dem Ziel, durch den Rückstoß des entstehenden Plasmajets möglichst definierte Impulsbits zu generieren, die bei einer hochfrequenten Laserpulsfolge der Schuberzeugung im μN -Bereich dienen sollen.

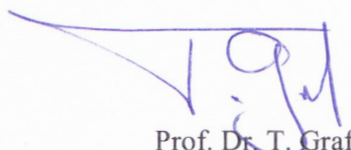
Der flächige Abtrag soll bei hoher Qualität, also in einer Art und Weise erfolgen, die nach der Bearbeitung des Targets eine möglichst ebene Fläche zurücklässt. Hier haben unterschiedliche Parameter wie Elektron-Phonon-Relaxationszeit des Materials und Laserparameter wie Wellenlänge, Pulsform, Polarisation, Pulsenergie und Pulsdauer einen Einfluss. In der vorliegenden Arbeit sollen hierzu folgende Aufgaben bearbeitet werden:

- Einarbeitung in die Ergebnisse und den Versuchsaufbau aus einer vorangegangenen Abschlussarbeit
- Weiterentwicklung / Optimierung eines vorhandenen Versuchsaufbaus für Vakuumexperimente
- Durchführung von Experimenten zum Materialabtrag für unterschiedliche Laserparameter
- Untersuchung der bearbeiteten Proben
- Auswertung und Diskussion der Daten



Dr. R. Weber

Leiter Verfahrensentwicklung



Prof. Dr. T. Graf

Prüfer

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Verzeichnis der verwendeten Formeln und Abkürzungen | 5 |
| 1 Einleitung | 8 |
| 2 Grundlagen | 10 |
| 2.1 Energiespezifisches Volumen | 10 |
| 3 Versuchsaufbau | 12 |
| 3.1 Aufbau | 12 |
| 3.2 Konstruktive Verbesserungen | 14 |
| 3.2.1 Teleskophalterung | 14 |
| 3.2.2 Goniometer | 15 |
| 3.2.3 Blende | 16 |
| 4 Methoden | 17 |
| 5 Experimente | 20 |
| 5.1 Laserquelle | 20 |
| 5.2 Ablationsmuster und Probenaufbau | 23 |
| 6 Auswertung der Experimente | 25 |
| 6.1 Ermittlung der Ablationsschwelle | 25 |
| 6.2 Einfachüberfahrten | 30 |
| 6.2.1 Oberfläche | 31 |
| 6.2.2 Volumen | 35 |
| 6.2.3 Energiespezifisches Volumen | 36 |
| 6.3 Mehrfachüberfahrten | 38 |
| 6.3.1 Oberfläche | 38 |
| 6.3.2 Volumen | 43 |
| 6.3.3 Normierung des Volumenabtrags in Bezug auf Einfachüberfahrten | 47 |
| 6.4 Diskussion Mikroantriebe | 50 |
| 6.4.1 Energiespezifisches Volumen | 51 |
| 7 Zusammenfassung und Ausblick | 52 |
| 8 Literaturverzeichnis | 54 |
| Anhang A: Fertigungszeichnungen | 56 |
| Anhang B: Volumen Einfachüberfahrten | 60 |
| Anhang C: Energiespezifisches Volumen Einfachüberfahrten | 61 |

| | |
|--|-----------|
| Anhang D: REM-Aufnahmen Mehrfachüberfahrten | 62 |
| Anhang E: Energiespezifisches Volumen Mehrfachüberfahrten | 65 |
| Anhang F: Makrobefehle | 66 |

Verzeichnis der verwendeten Formeln und Abkürzungen

Formelzeichen - Lateinisches Alphabet

| | | |
|---------------------|--|---|
| b | - | x-Achsenabschnitt Regressionsgerade |
| c_M | $(\mu\text{m}\cdot\text{N})/\text{W}$ | Impulskoppelkoeffizient |
| D | μm | Schädigungsdurchmesser |
| d_f | μm | Fokusbereich |
| d_a | μm | äußerer Schädigungsdurchmesser |
| d_i | μm | innerer Schädigungsdurchmesser |
| d_s | μm | Schädigungsdurchmesser |
| E_P | μJ | Pulsenergie Einzelpuls |
| E_{SP} | μJ | Spitzenpulsenergie Einzelpuls |
| f | kHz | Repetitionsrate |
| f_{rel} | μm^3 | relativer Volumenfehler |
| F | - | Fluenzabhängiger Faktor |
| g | $\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{s}^2)$ | Gravitationskraft |
| I_{Sp} | s | Spezifischer Impuls |
| I | W/cm^2 | Intensität |
| m | - | Steigung Regressionsgerade |
| m_e | $\text{mm}^3\cdot\text{kg}/(\text{W}\cdot\text{min}\cdot\text{m}^3)$ | energiespezifische Masse |
| M^2 | - | Strahlparameterprodukt |
| P | W | eingestrahlte Leistung pro Laserpuls |
| PU | % | Pulsüberlapp |
| r | μm | Abstand zur Spotmitte |
| r_x | μm | Schädigungsradius x-Richtung |
| r_y | μm | Schädigungsradius y-Richtung |
| r_{mittel} | μm | gemittelter Schädigungsradius |
| Std_z | μm | Standardabweichung der Abtragstiefe |
| V_{abl} | μm^3 | ablatiertes Volumen pro Ablationsfeld |
| V_E | $\text{mm}^3/(\text{W}\cdot\text{min})$ | energiespezifisches Volumen |
| $\langle v \rangle$ | m/s | mittlere Geschwindigkeit der Partikel im Ablationsjet |
| v_m | m/s | Markiergeschwindigkeit |

| | | |
|-------------------|---------------|------------------------------------|
| z_a | nm | Ablationstiefe |
| z_b | nm | Beschichtungsdicke |
| z_{\max} | nm | Ablationstiefe nach 63 Überfahrten |
| z_R | mm | Rayleighlänge |
| z_{mean} | μm | Mittelwert der Abtragstiefe |

Formelzeichen - Griechisches Alphabet

| | | |
|------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| α | 1/cm | Absorptionskoeffizient |
| α_c | 1/cm | Absorptionskoeffizient für Kupfer |
| α_g | 1/cm | Absorptionskoeffizient für Gold |
| δ | nm | Energieeindringtiefe |
| δ_{\min} | nm | minimale Energieeindringtiefe |
| δ_{\max} | nm | maximale Energieeindringtiefe |
| ΔV | μm^3 | pro Laserpuls ablatiertes Volumen |
| η_{Jet} | - | Jetteffizienz |
| λ | nm | Wellenlänge |
| ρ | g/cm^3 | Dichte |
| ϕ | J/cm^2 | Fluenz |
| ϕ_{SP} | J/cm^2 | Spitzenfluenz |
| ϕ_{th} | J/cm^2 | Ablationsschwelle |
| $\Phi_{\text{th,min}}$ | J/cm^2 | minimale Ablationsschwelle |
| $\Phi_{\text{th,max}}$ | J/cm^2 | maximale Ablationsschwelle |
| ω_0 | μm | Fokusradius |
| ω_{0h} | μm | horizontaler Fokusradius |
| ω_{0v} | μm | vertikaler Fokusradius |
| Δ | μm | Spotabstand |

Abkürzungen

| | |
|-----|------------------------------------|
| BE | Strahlaufweiter |
| BS | Beam Sampler |
| BS1 | polarisierender Strahlteilerwürfel |
| FI | Fraday Isolator |

| | |
|-----------|---------------------------------|
| F- Φ | F-Theta-Objektiv |
| LL | Laserleistung |
| PS1,PS2 | Energiemessgerät |
| S1-S5 | Spiegel 1 bis 5 |
| SG1 | Schauglas |
| SG2 | Schutzglas |
| SI | Shearing Interferometer |
| FFT | Schnelle Fourier-Transformation |

1 Einleitung

Präzise Gravitationsexperimente im Weltall erfordern ein Antriebskonzept, dass in der Lage ist, eine präzise Lage- und Orbitkontrolle bei einer Positioniergenauigkeit von ≤ 10 nm zu gewähren. Die große Herausforderung besteht darin, einen möglichst „geräuschfreien“ Schub zu erzeugen. Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Mikroantriebskonzepte wie zum Beispiel „Gas Proportional thrusters“, „MEMS-based thrusters“ oder wie in der aktuellen LISA (Laser Interferometer Space Antenna) Pathfinder Forschungsmission eingesetzte „Field Emission Electric Propulsion“ entwickelt[1]. Ein weiteres Konzept stellen die Laser-ablativen Mikroantriebe dar. Eine erstmalige Erwähnung der Schuberzeugung durch Erwärmung und Ablation eines Treibstoffes mittels Laser fand 1972 durch A. Kantrowitz statt [2]. Drei- ßig Jahre später wurde von C. Phipps der Vorschlag unterbreitet, einen Laser-ablativen Mikroantrieb in einem Satelliten zu integrieren[3].

Am Institut für Technische Physik des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart werden die Laser-ablativen Mikroantriebe erforscht. Auf Basis eines Festkörper Treibstoffmaterials wird über den im Ablationsprozess entstandenen Rückstoß ein definierter Schub erzeugt. Der Materialabtrag erfolgt mittels eines gepulsten Mikrochiplasers. Bild 1.1 zeigt eine schematische Darstellung des MICROLAS Konzepts des DLR.

Der gepulste Microchiplaser (L) wird über einem F- Θ Objektiv (O) mit fester Brennweite und dem Planspiegel (M) auf ein metallisches Target (T) fokussiert. Die Umlenkung des Laserstrahls über den Planspiegel (M) hat zudem die Aufgabe, die Optiken zu schützen. Eine laterale Strahlsteuerung wird mit einer elektrooptischen Linse (EO2) realisiert. Um mit steigender Abtragstiefe die Fokusslage den neuen Bearbeitungsbedingungen anzupassen, kann mittels einer weiteren elektrooptischen Linse (EO3) die Fokusslage nachgestellt werden. Die Schuberzeugung resultiert aus der Ablation des metallischen Targetmaterials entstandenen Rückstoßes. Parameter zur Schubregulierung sind unter anderem das Treibstoffmaterial, das Ablationsschema und der verwendete Mikrochiplaser.

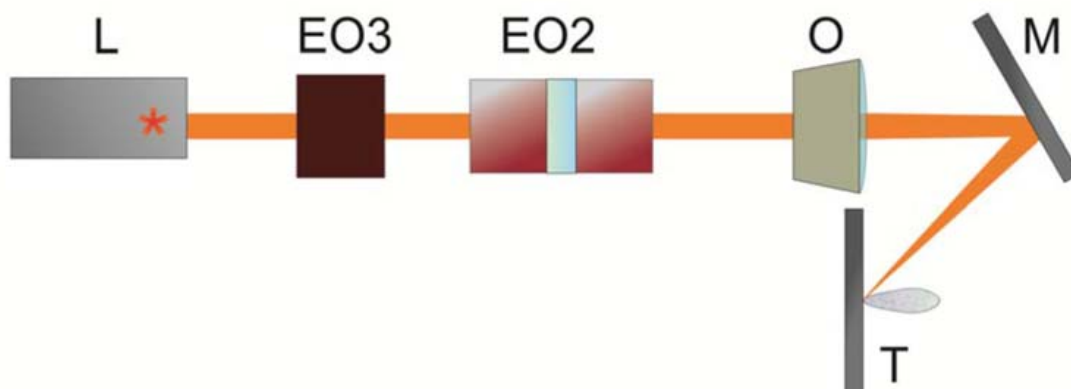


Bild 1.1: MICROLAS Konzept: gepulster Mikrochiplaser (L), elektro-optische Linse (EO3) mit variabler Fokusslänge, elektrooptische laterale 2D-Strahlsteuerung (EO2), Optische Linse mit fester Fokusslänge (O), Planspiegel (M) und metallisches Target (T) [4].

Bei der Umsetzung dieses Mikroantriebskonzepts wird der Vermeidung bewegter Komponenten ein hoher Stellenwert zugesprochen, da sonst die Schubkräfte von $0,1 \mu\text{N}$ bis 1 mN durch Schubrauschen beeinflusst werden. Demzufolge kann als eine der möglichen Quelle für Schubrauschen der Ablationsprozess identifiziert werden. Um genaue Vorhersagen über die erzeugten Schubkräfte bzw. das Schubrauschen machen zu können, besteht die Notwendigkeit, das Ablationsverhalten des metallischen Treibstoffmaterials über einen längeren Zeitraum hinweg zu untersuchen.

In dieser Arbeit wird ein vorhandener Versuchsaufbau zur Untersuchung des Materialabtrages auf neue Bearbeitungsparameter angepasst und optimiert. Die Experimente für verschiedene metallische Materialien werden in einer Vakuum-Laserablationskammer durchgeführt. Dabei wird das Abtragsverhalten bei Variation von Fluenz und Pulsüberlapp von Ablationsfeldern untersucht. Bei der anschließenden Auswertung und Diskussion der Ablationsfeldeigenschaften wird insbesondere auf die Oberflächeneigenschaften so wie den Volumenabtrag eingegangen.

2 Grundlagen

2.1 Energiespezifisches Volumen

Das energiespezifische Volumen V_E bildet sich nach Neuenschwander et. al. [5] aus dem abgetragenen Volumen V pro Zeiteinheit und der eingestrahnten Leistung P entsprechend Gleichung 2.1. Die Zeiteinheit kann als Prozessdauer beschrieben werden wobei in diesem Zusammenhang das energiespezifische Volumen V_E zur Abschätzung des Prozesswirkungsgrades herangezogen werden. Nach [6] wird das energiespezifische Volumen in $\text{mm}^3/(\text{W} \cdot \text{min})$ angegeben.

$$V_E = \frac{\dot{V}}{P} \quad (2.1)$$

Grundlage für die Herleitung des energiespezifischen Volumens bildet die Ablationstiefe z_{abl} , diese definiert sich aus dem Produkt der Energieeindringtiefe δ und einer logarithmischen Abhängigkeit der Fluenz ϕ [7].

$$z_{abl} = \delta \cdot \ln \left(\frac{\phi}{\phi_{th}} \right) \quad (2.2)$$

Unter Annahme gaußförmiger Laserstrahlen lässt sich die Fluenz in Abhängigkeit des Abstandes r vom Mittelpunkt des Spots nach 2.3 berechnen [8].

$$\phi(r) = \phi_0 \cdot e^{-2 \cdot \frac{r^2}{\omega_0^2}} \quad (2.3)$$

Es ergibt sich durch einsetzen von Gleichung 2.3 in 2.2 die Ablationstiefe in Abhängigkeit des Abstandes r zum Zentrum des Laserspots zu

$$z_{abl}(r) = \delta \cdot \left(\ln \left(\frac{\phi}{\phi_{th}} \right) - 2 \cdot \frac{r^2}{\omega_0^2} \right). \quad (2.4)$$

Durch Einsetzen der Spitzenfluenz ϕ_0 [9]

$$\phi_0 = 2 \cdot \phi = \frac{2 \cdot E_P}{\pi \cdot \omega_0^2} = \frac{E_{SP}}{\pi \cdot \omega_0^2} \quad (2.5)$$

in Gleichung 2.4 kann das pro Laserpuls ablatierte Volumen ΔV bestimmt werden:

$$\Delta V = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \delta \cdot \omega_0^2 \cdot \ln^2 \left(\frac{\phi_0}{\phi_{th}} \right). \quad (2.6)$$

Dividiert durch die pro Laserstrahl eingestrahlte Energie E_P

$$E_P = \pi \cdot \phi \cdot \omega_0^2 \quad (2.7)$$

ergibt sich das energiespezifische Volumen V_E für gaußförmige Laserstrahlen zu [7]

$$V_E(\phi) = \frac{1}{4} \cdot \frac{\delta}{\phi} \cdot \ln^2 \left(2 \cdot \frac{\phi}{\phi_{th}} \right). \quad (2.8)$$

Um den Bezug des energiespezifischen Volumens V_E in Abhängigkeit der für die Laser-ablativen Mikroantriebe relevanten Kenngrößen zu setzen, wird der Impulskoeffizient C_m betrachtet, welcher das Verhältnis des durch einen Einzelpuls erzeugten Impulses Δp zur Pulsenergie E_P beschreibt [10, 11].

$$c_m = \frac{\Delta p}{E_P} = \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \eta_{Jet} \cdot V_E} \quad (2.9)$$

wobei sich die Jeteffizienz η_{Jet} näherungsweise zu

$$\eta_{Jet} = \frac{\sum m \cdot v^2}{2E} \approx \frac{\Delta m \langle v \rangle^2}{2E} \approx \frac{1}{2} \cdot g \cdot c_m \cdot I_{Sp} \quad (2.10)$$

berechnen lässt.

Durch Einsetzen von Gleichung 2.10 in 2.9 erhält man das energiespezifische Volumen V_E in Abhängigkeit zweier konstanter Faktoren, der Gravitationskraft g und materialabhängigen Dichte ρ , sowie dem Impulskoppelkoeffizient C_m und spezifischem Impuls I_{Sp} .

$$V_E = \frac{c_m}{g \cdot \rho \cdot I_{Sp}} \quad (2.11)$$

Diese Darstellung wurde gewählt um möglichst einfach eine Aussage über die Qualität eines Mikroantriebes machen zu können. Zudem ermöglicht diese Form eine schnelle Vergleichbarkeit verschiedener Datensätzen. Experimentell ermittelte Werte für C_m und I_{Sp} sind am DLR nur in geringem Maße vorhanden, so dass Gleichung 2.11 primär zur Validierung von Simulationsergebnissen [12] herangezogen werden kann.

3 Versuchsaufbau

Als Grundlage des Versuchsaufbaus dient ein vorangegangenes Experiment welches ein 10 ps Lasersystem nutzte [11]. An dem vorhandenen Aufbau wurde das Lasersystem gegen ein 500 ps Lasersystem getauscht und für die weiteren Experimente angepasst. Des Weiteren wurde der Versuchsaufbau auf die neuen Gegebenheiten angepasst und verbessert.

3.1 Aufbau

Bild 3.1 zeigt die schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. Der ausgekoppelte Laserstrahl (in Kapitel 5.1 werden detaillierte Informationen zur Laserquelle gegeben) durchläuft zuerst eine $\lambda/2$ Verzögerungsplatte, welche im weiteren Verlauf der Experimente mittels Beam Splitter (BS) und Energiemesskopf (PS1) zum Einstellen der gewünschten Energie bei der Bearbeitung dient. Der nachfolgende Faraday Isolator (FI) absorbiert Rückreflexe des Laserstrahls um den Laserresonator zu schützen. Die Linse (L1) weitet den Laserstrahl auf, welcher dann über die Spiegel (S1) und (S2) über ein zwischen Spiegel (S2) und (S3) befindliches Schienensystem geleitet wird. Für die Energiemessung wird ein Teil des Laserstrahls über einen Beam Sampler (BS) auf den Energiemesskopf (PS1) reflektiert. Im vorherigen Aufbau wurde die Energiemessung mittels eines polarisierenden Strahlteilerwürfels durchgeführt, was sich als eine mögliche Fehlerquelle herausstellte. Durch die variationsfreie Energiemessung über den Beam Sampler wird diese Fehlerquelle eliminiert. Das Teleskop BE weitet den Laserstrahl nochmals auf, um den geforderten Fokusbereich an der Bearbeitungsstelle realisieren zu können. Spiegel (S4) lenkt den Strahl über ein weiteres Schienensystem, auf dem eine $\lambda/4$ Verzögerungsplatte installiert ist um den Laserstrahl zirkular zu polarisieren. Die weiteren optischen Komponenten auf diesem Schienensystem (Strahlteilerwürfel (BS1), Energiemesskopf (PS2), Shearing Interferometer (SI) sind nur temporär im Strahlengang integriert. Sie dienen zur Überprüfung der zirkularen Polarisation und Kollimation des Laserstrahls. Das Überprüfen der Kollimation mittels Shearing Interferometer war in dem vorherigen Experiment aufgrund der kürzeren Pulslänge nicht möglich. Diese Maßnahme trägt dazu bei, die Prozessparameter über die gesamte Versuchszeit zu überprüfen und ggf. nachjustieren, so dass immer gleiche Bearbeitungsbedingungen herrschen. Anschließend wird der Laserstrahl über Spiegel (S5) in die Galvanometerscannereinheit Typ inelliSCAN_{se} 14 [13] eingekoppelt und mittels telezentrischem F- Θ Objektiv (Arbeitsabstand 215 mm, effektive Brennweite 167 mm) auf die Bearbeitungsprobe fokussiert. Zu Justagezwecken ist die Galvanometerscannereinheit auf einem x-y - Kreuztisch montiert. Über eine am Galvoscaner angebrachte Kamera und der am Vakuumtopf befindlichen LED kann der Bearbeitungsprozess beobachtet werden. Der Laserstrahl durchläuft Schauglas SG1, Schutzglas SG2 sowie die Blende und trifft auf das im Probenhalter festgespannte Werkstück. Der Probenhalter ist ebenfalls in x- und y-Richtung sowie in der Höhe z verfahrbar um das Werkstück zu positionieren und die Fokusslage auf die Bearbeitungsebene zu justieren. Zur Erzeugung des Vakuums ist eine Scrollpumpe (Oerlikon, SCROLLVAC SC 15 D) über einen Schlauch an der Vakuumkammer angeflanscht. Die Drucküberwachung erfolgt über ein Druckmessgerät vom Typ Oerlikon IONIVAC ITR 90. Es wurde dabei ein Druck von bis zu $3,5 \cdot 10^{-3}$ mbar erreicht.

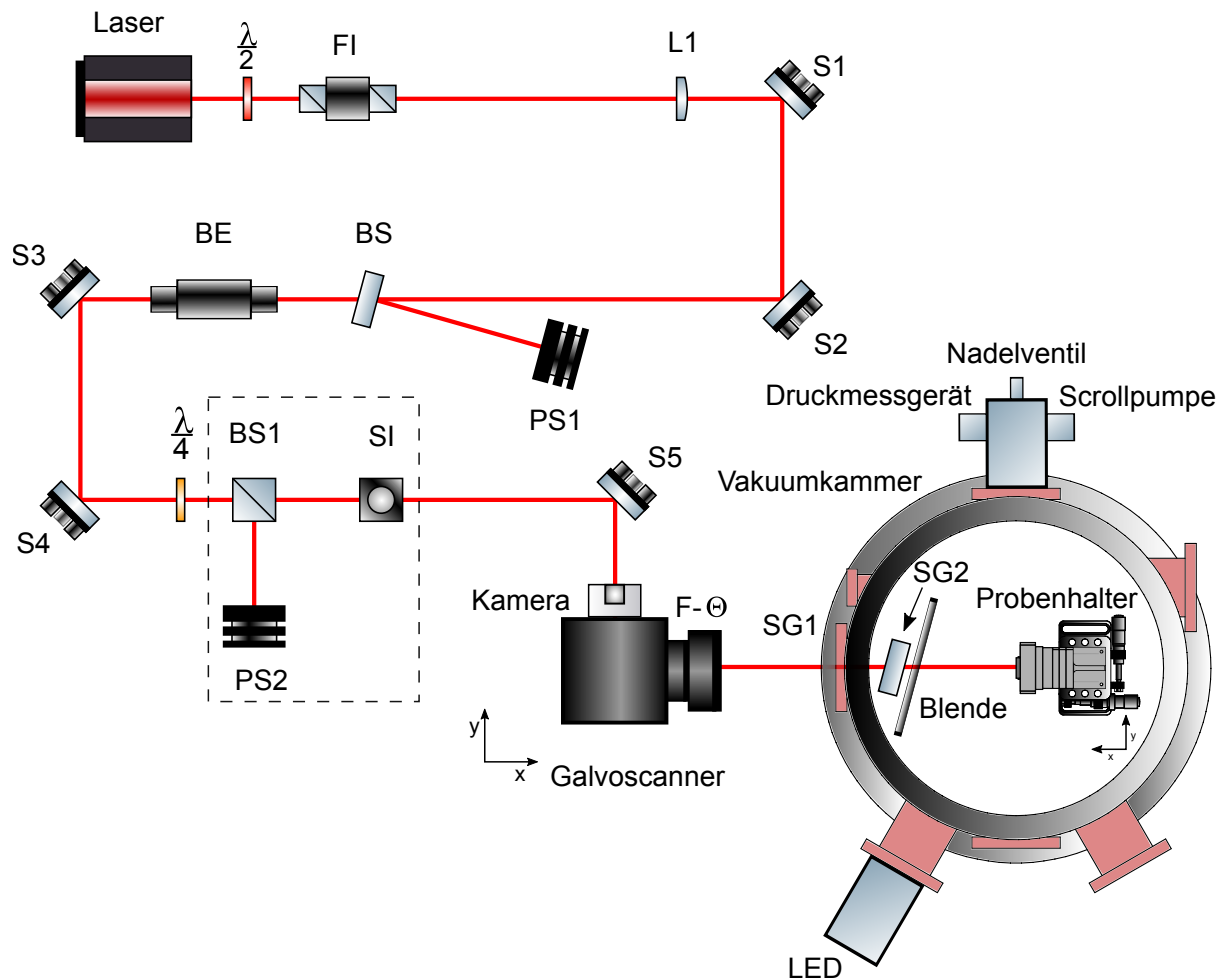


Bild 3.1: Versuchsaufbau: Faraday Isolator (FI), Linse (L1), Spiegel (S1 - S5), Verzögerungsplättchen ($\lambda/2$, $\lambda/4$), polarisierender Strahlteilerwürfel (BS1), Shearing Interferometer (SI), Energiemesskopf (PS1 und PS2), Galvanometerscanner mit Kameradapter und F- Θ -Objektiv (F- Θ) auf x-y Kreutztisch, Schauglas (SG1), Schutzglas (SG2), Blende, Probenhalter mit Werkstück auf x-y Kreutztisch, Vakuumkammer mit angeflanschem Druckmessgerät, Scrollpumpe und LED, Nd:YAG Bearbeitungslaser.

3.2 Konstruktive Verbesserungen

Neben den bereits im Kapitel Versuchaufbau beschriebenen Verbesserungsmaßnahmen wurden zudem konstruktive Maßnahmen durchgeführt. Diesen werde im Folgenden näher betrachtet. Detaillierte Konstruktionsdetails können den Fertigungszeichnungen (Anhang A) im Anhang entommen werden.

3.2.1 Teleskophalterung

Die vorhandene Teleskophalterung konnte nur mit mechanischen Stabilitätsproblemen in den Strahlengang zu integriert werden. Die neue Konstruktion der Teleskophalterung verfügt über eine geschlitzte Übermaßpassung, so dass das Teleskop leichtgängig eingeführt und mittels einer Schraube geklemmt werden kann. Die Teleskophalterung kann mittels zwei Stativstiften und den dazugehörigen Reitern auf einem Schienensystem befestigt werden. Durch die minimale Tolerierung der Stativstifte, Aufnahmebohrungen und dem planparalleln Bezug der Bohrungsachse der Teleskopaufnahme wird gewährleistet, dass das Teleskop ohne lange Ausrichtprozedur in den Strahlengang integriert werden kann.

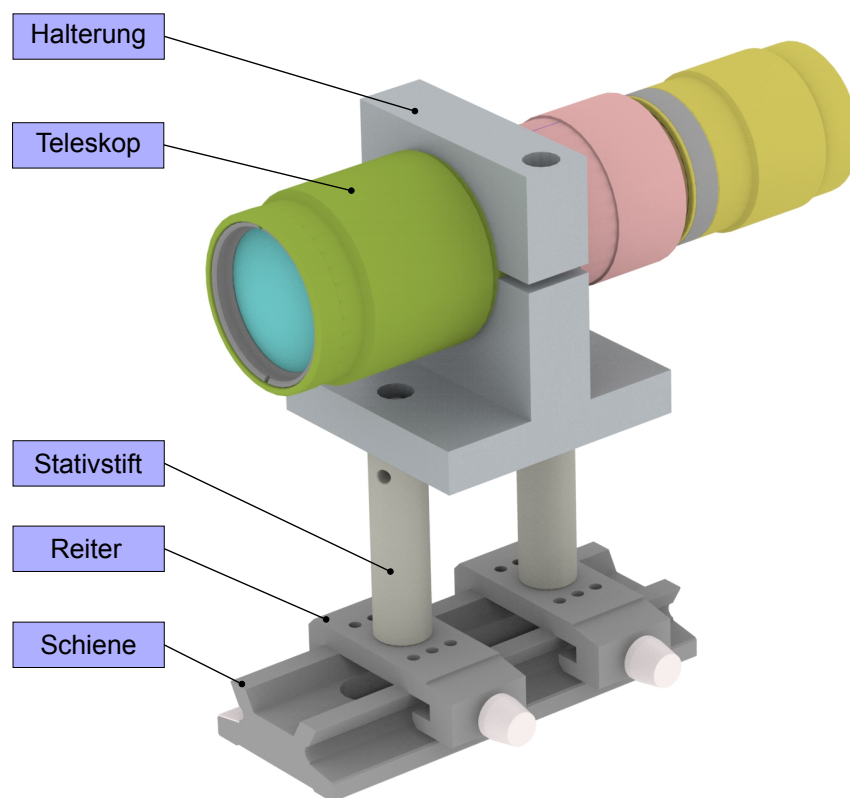


Bild 3.2: Teleskophalterung über zwei Stativstifte mit Reitern auf Schienensystem.

3.2.2 Goniometer

Für die Auswertung der bearbeiteten Proben werden diese mit Hilfe eines Weißlichtinterferometers Vee-co NT9100 profilometriert. Dazu werden die Proben mit Hilfe eines Probenhalters direkt auf den in zwei Achsen schwenkbaren Tisch des Weißlichtinterferometers befestigt. Der Nachteil hierbei ist, dass nicht immer die gesamte Oberfläche der Probe planparallel zum Objektiv ausgerichtet werden kann. Um den ganzen Scanbereich abzudecken, ist es notwendig die Probe fortwährend nachjustieren. Eine Automatisierung des Scanprozesses ist unter diesen Bedingungen nicht möglich. Durch ein zusätzliches Goniometer Typ Thorlabs GN2M wird die Grundlage geschaffen den Scanprozess zu automatisieren. Dieses wird mittels einer Adapterplatte fest auf den Tisch des Weißlichtinterferometers montiert. Der eigentliche Probenhalter wird nun auf dem Goniometer verschraubt. Dazu wurde die feste Backe mit einem neuen Bohrbild gefertigt. Die beiden Führungszylinder der beweglichen Backe wurden ebenfalls erneuert, da diese deutliche Verschleißerscheinungen durch die Klemmschrauben aufwiesen und keine fehlerfreie Führung mehr gewährleisten konnten. Die neuen Führungszylinder sind aus Edelstahl, was die Lebensdauer verlängert. Es ist nun möglich, durch die beiden zusätzlichen Schwenkachsen des Goniometers die gesamte Probenoberfläche planparallel zum Objektiv auszurichten. Der große Vorteil hierbei ist, dass die Probe nur einmal am Anfang des Mikroskopierens ausgerichtet werden muss. Ohne neue Justagearbeit kann nun die Probe durch ein definiertes Scanpattern automatisiert mikroskopiert werden.

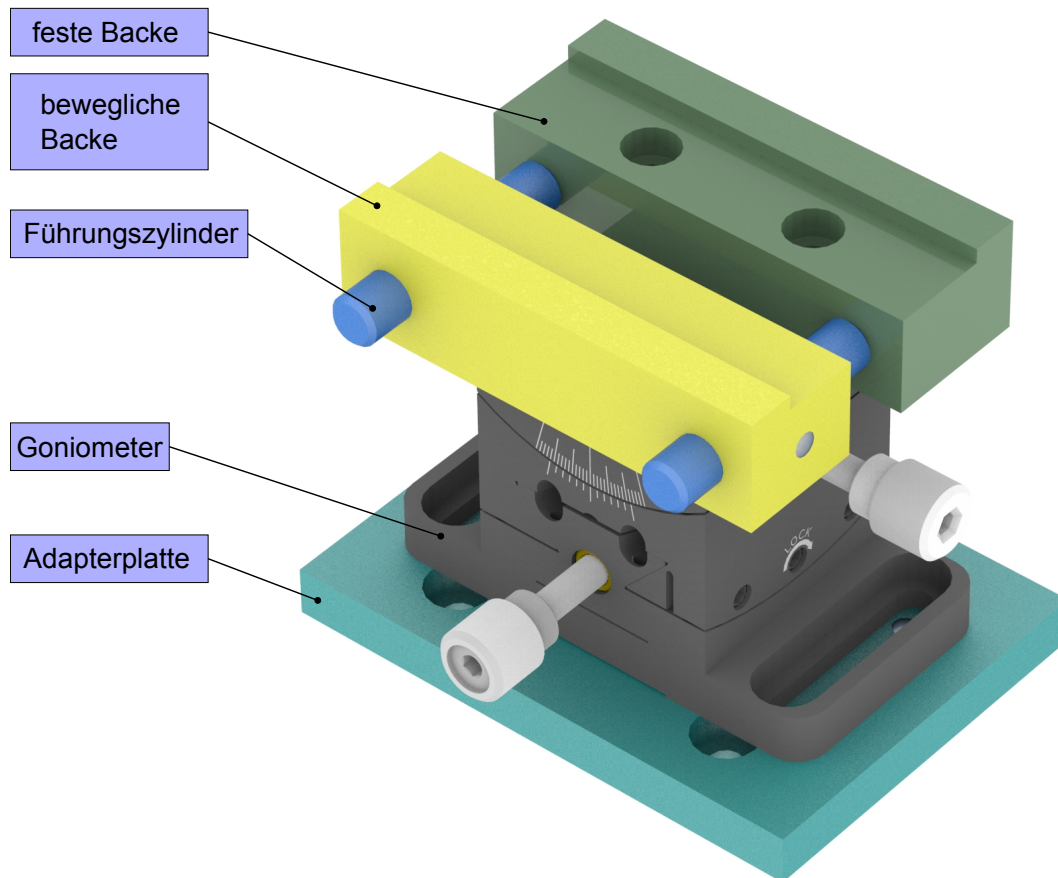


Bild 3.3: Goniometer Typ Thorlabs GN2M mit Adapterplatte und Werkstückaufnahme.

3.2.3 Blende

In der zuletzt durchgeführten Messkampagne [11] wurde auf die Problematik der Schauglasbeschichtung, verbunden mit einem Leistungsverlust bei Abtragsversuchen über einen längeren Zeitraum, hingewiesen. Als mögliche Lösung wurde unter anderem vorgeschlagen, ein Schutzglas in der Vakuumkammer zu positionieren, um einen schnellen Wechsel des Glases zu ermöglichen. Im aktuellen Versuchsaufbau wurde diese Lösung realisiert. Zusätzlich wird eine Blende vor dem Schutzglas montiert. Damit wird ein möglichst großer Bereich vor dem ablatierten Material geschützt. Die Blende verfügt über einen 30x30 mm großen Ausschnitt und ein Langloch zur Positionierung, so dass der Laserstrahl das komplette Ablationsfeld der Probe abdecken kann.

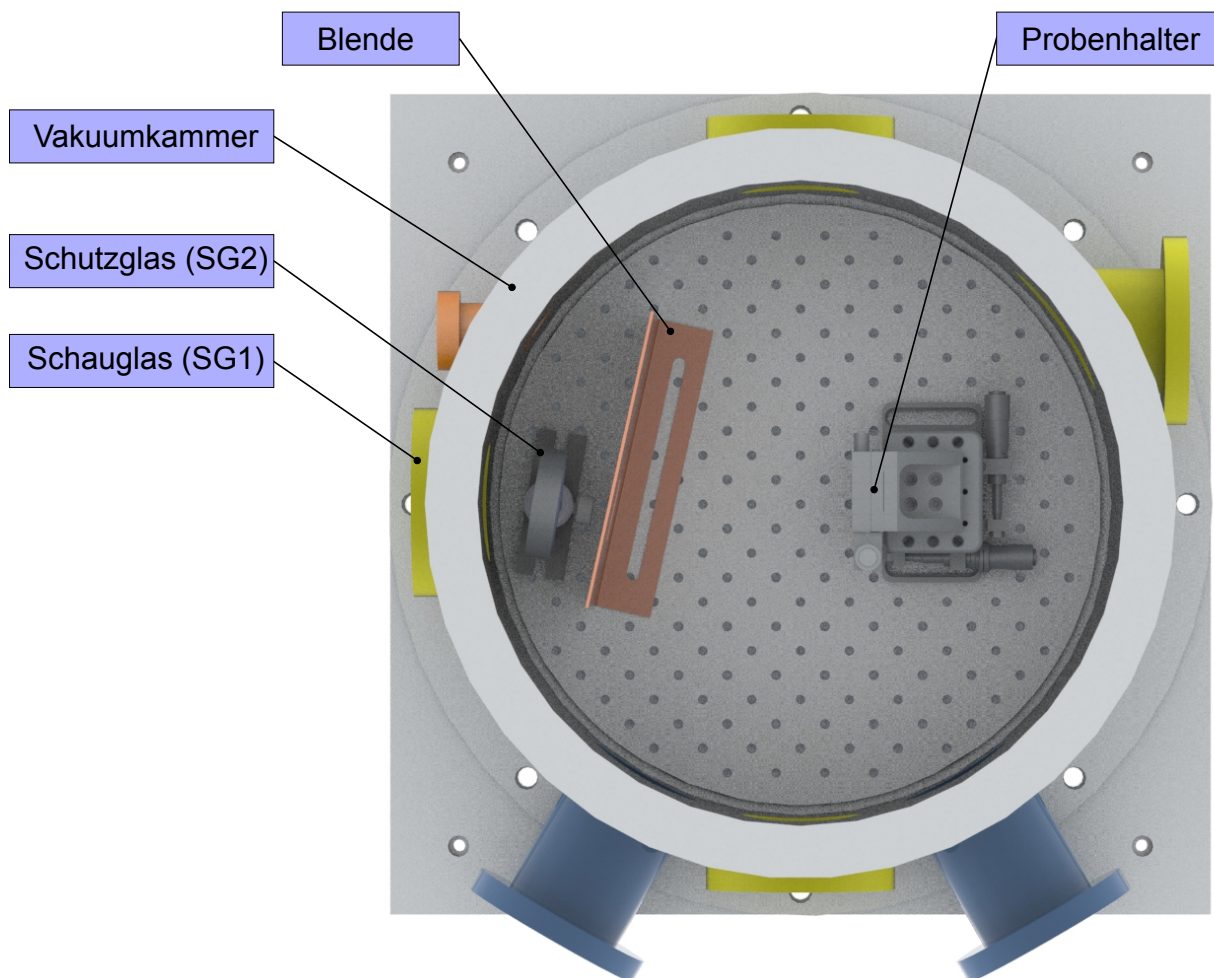


Bild 3.4: Positionierung von Blende und Schutzglas (SG2) in Vakuumkammer.

4 Methoden

Durch die in Kapitel 2.2 beschriebenen Verbesserungen sowohl am Versuchsaufbau als auch bei den nachgehenden Auswertungsarbeiten ist es möglich, die Prozesse des Mikroskopierens zu automatisieren. Für die Auswertung der am Veeco NT9100 erzeugten Daten wurde das Programm Fiji (Fiji is just ImageJ) [14] mit der ImageJ Version 1.50E [15] verwendet. Das ausgegebene Dateiformat „.opd“ (Optical Path Difference) der am Weißlichtinterferometer erzeugten Daten ist inkompatibel mit ImageJ und lässt sich nicht öffnen. Da aber auf die Möglichkeit der automatischen Datenauswertung mit Hilfe von Makrobefehlen durch ImageJ nicht verzichtet werden sollte galt es, die Ausgangsdaten so umzuwandeln, dass die weitere Auswertung in ImageJ erfolgen konnte. Im Weiteren werden die Hauptfunktionen der Makros kurz beschrieben und erläutert, für detailliertere Informationen vgl. Quellcode im (Anhang D). Die geschriebenen Makros sind jeweils in Hauptmakro und Untermakro unterteilt. Sofern das Hauptmakro gestartet wird, werden für die ausgegebenen Daten Ordner bzw. Unterordner mit automatisch generierten Namen erzeugt und im Weiteren die jeweiligen Untermakros ausgeführt. Zudem besteht die Möglichkeit, jedes Untermakro einzeln auszuführen.

In Bild 4.1 ist die Abfolge der Rohdatenverarbeitung dargestellt um die erforderlichen Daten zur Auswertung der Experimente gewinnen zu können.

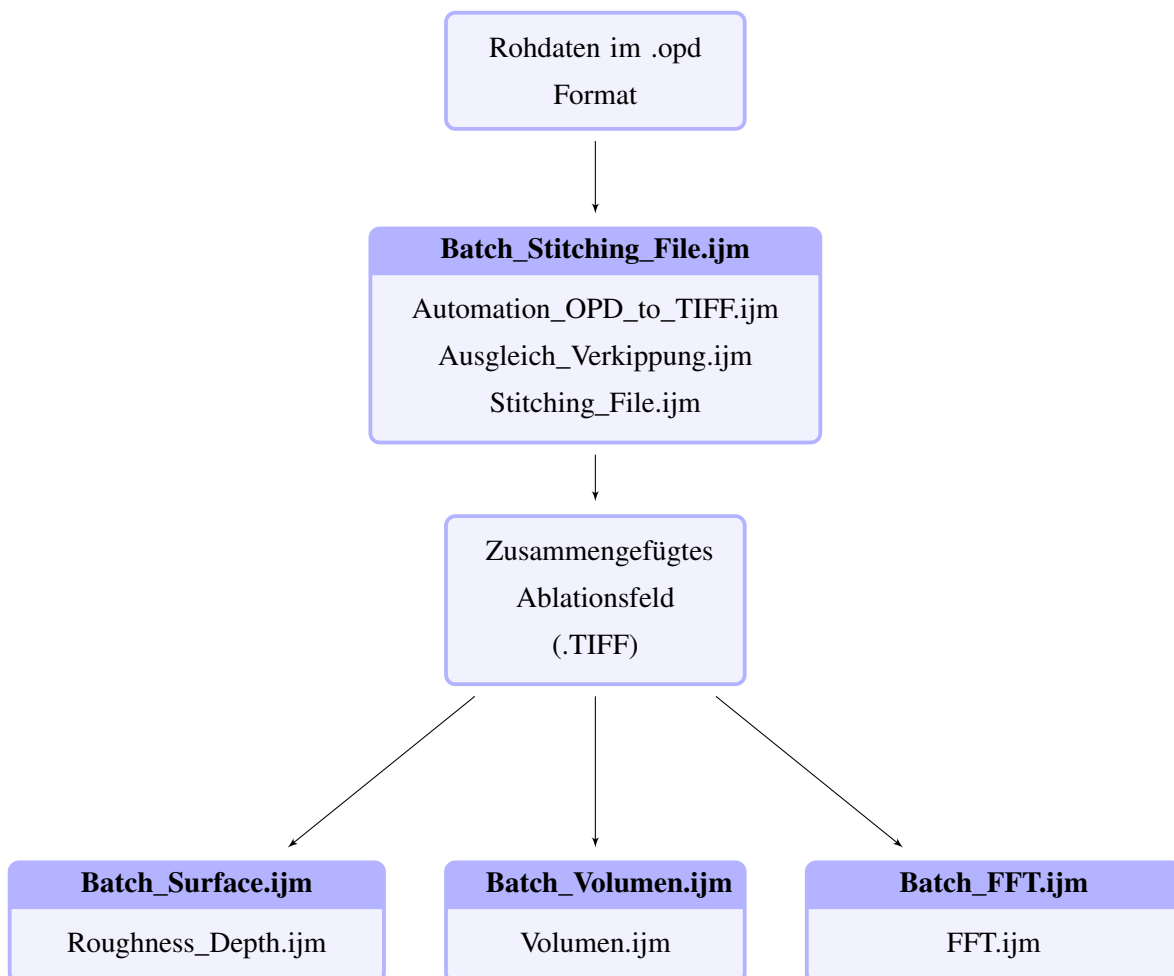
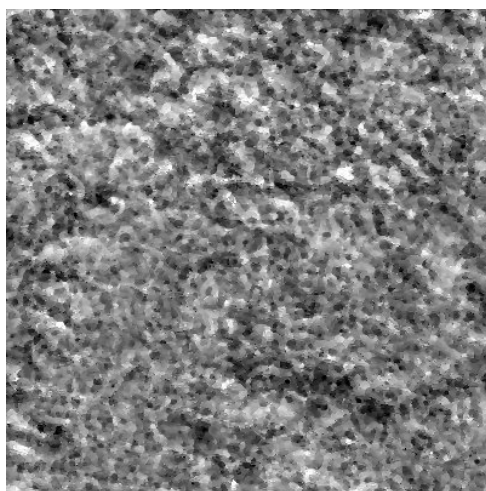


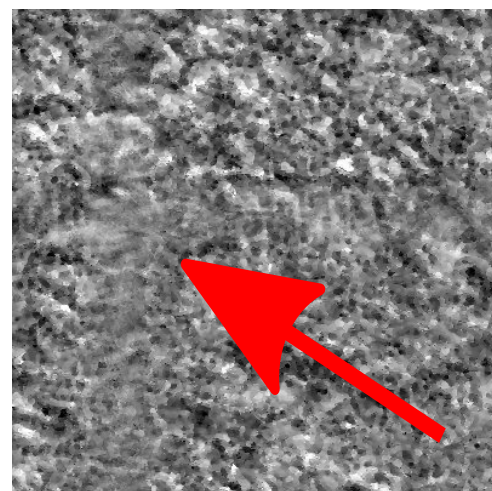
Bild 4.1: Flussdiagramm der Rohdatenverarbeitung mit Haupt- und Untermakros zur Generierung der Auswertungsdaten.

Der Hauptmakrobefehl „Batch_Stitching_File.ijm“ beinhaltet die Untermakros „Automation_OPD_to_TIFF.ijm“, „Ausgleich_Verkipfung.ijm“, und „Stitching.ijm“. Im Untermakro „Automation_OPD_to_TIFF.ijm“ werden die „opd“ Daten im Raw Modus und mit der zuvor in Gwyddion 2.41 ermittelten Auflösung und Offset in ImageJ importiert. Im darauffolgenden Schritt wird die Pixelgröße definiert, das Bild zugeschnitten und gedreht. Der Zuschnitt ist nötig, da im Randbereich der Aufnahmen Fehlstellen vorhanden sind. Über einen definierten Schwellwert werden, falls vorhanden, fehlende Bilddaten entfernt, welche sonst die automatische Auswertung verfälschen bzw. nicht möglich machen würden. Im letzten Schritt wird ein Skalierungsfaktor definiert, der die Maßhaltigkeit der Auswertungsdaten sichert. Anschließend wird im Untermakro „Ausgleich_Verkipfung.ijm“ die Verkipfung der Einzelbilder ausgeglichen. Trotz des manuellen Ausrichtens der Proben durch das Goniometer weisen die Einzelbilder eine minimale Verkipfung (> 100 nm) auf, welche die Auswertung der zusammengeführten Ablationsfelder verfälschen würde. Es wird die minimale Standardabweichung der Einzelbilder eines Ablationsfeldes ermittelt und von allen anderen Einzelbildern subtrahiert. Darauffolgend werden die 63 Einzelbilder eines Ablationsfeldes im Untermakro Stitching.ijm zu einem kompletten Ablationsfeld zusammengefügt. Für das Stitching der Einzelbilder wurden die Aufnahmen mit einem Überlapp von 20 % aufgenommen. Nach der Umwandlung bzw. dem Zuschnitt beträgt der Überlapp noch 18 %. Der Überlapp ist notwendig um den Stitchingalgorithmus genügend Datenpunkte zur Verfügung zu stellen um die Einzelbilder nahtlos, ohne Fehlstellen zu einem kompletten Ablationsfeld zusammenzufügen.

Bei bestimmten Bearbeitungsparametern weisen die entstandenen Strukturen der Ablationsfelder eine Regelmäßigkeit auf, die beim Zusammenfügen der Einzelbilder zu „Verwaschungen“ bzw. Doppelungen führt, die das Messergebnis negativ beeinflussen, siehe Bild 4.2. Aus diesem Grund wurden die Positionierungskordinaten der Einzelbilder eines fehlerfrei zusammengeführten Ablationsfeldes ausgelesen und in einem Master Template abgespeichert. Da alle Proben mit den gleichen Einstellungen mikroskopiert wurden, können die in der Datei enthaltenen Positionierungskordinaten auf alle anderen Aufnahmen angewendet werden.



(a) Stitching mit Master Template



(b) Stitching ohne Master Template

Bild 4.2: Mikroskopierter Teilausschnitt des Ablationsfelds 2015_11_05_Alu_06_P20_C01: Vergleich des zusammenfügens der Einzelbilder zu einem Ablationsfeld mit und ohne Master Template.

Die Oberflächenanalyse erfolgt mit dem Hauptmakro „Batch_Surface.ijm“ und dessen Untermakro „Roughness_Depth.ijm“. Das PlugIn „SurfCharJ 1q“ [16] zur Oberflächenanalyse wurde für die Automatisierung im Quellcode umgeschrieben, so dass die Option „Level Surface“ und „Process Entire Stack“ von Anfang an ausgewählt ist. Für die Ermittlung der Oberflächenwerte wurde ein quadratischer Ausschnitt ohne Randbereich innerhalb des Ablationsfeldes definiert. Damit wird gewährleistet, dass die Messergebnisse nicht durch Ablationseffekte wie z.B. Materialauswurf oder schräge Kanten der Randbereiche verfälscht werden.

Für die Bestimmung der Volumina wird das Hauptmakro „Batch_Volumen.ijm“ mit Untermakro „Volumen.ijm“ aufgerufen. Es wird zu jedem Ablationsfeld automatisch eine Maske generiert, die nur den Bereich der ablatierten Fläche einnimmt. Da die Ablationsfelder durch den Materialabtrag eine definierte Außenkante aufweisen, kann ein Schwellwert definiert werden, der den unablatierten Bereich von der Maskierung ausschließt. Anschließend wird im maskierten Bereich die Fläche und Tiefe bestimmt, woraus das ablatierte Volumen berechnet wird.

Das Makro „Batch_FFT.ijm“ führt eine Schnelle Fourier-Transformation aus, welche das Frequenzspektrum der Ablationsfelder berechnet. Anhand dieser Daten können die einzelnen Bestandteile der Oberflächenstrukturgrößen anteilig dem Ra-Wert zugeordnet werden. Im Zuge der Auswertung wurden die Daten erhoben, jedoch ist die Interpretation dieser sehr komplex, so dass in Kapitel 7 lediglich eine rudimentäre Betrachtung stattfindet.

5 Experimente

5.1 Laserquelle

Bei der Laserquelle handelt es sich um einen passiven gütegeschalteten Nd:YAG Laser mit einer Wellenlänge von 1064 nm der Firma teem photonics Modell PNP-B08010. Das gaußförmige Strahlprofil der TEM00 Mode weist bei einer Pulslänge von 500 ps ein Strahlparameterprodukt von $M^2 \leq 1,3$ auf. Die durchschnittliche Pulsenergie beträgt 82,5 μJ bei einer Repetitionsrate von 1000 Hz [17]. Die Synchronisation der Repetitionsrate der Laserquelle mit dem Galvanometerscanner wurde mittels einer RTC5 Karte realisiert. Zur Überprüfung der Repetitionsrate wurde das Signal der Laserquelle abgegriffen und über ein Oszilloskop (Teledyne LeCroy Waverunner 64Xi) dargestellt.

Die Leistungsmessung erfolgt über den Beamsampler (BS), der unabhängig von der Variation des Ausgangsstrahls einen Teil des Laserstrahls auf den Energiemesskopf (Ophir PE9-F) reflektiert (vgl. Bild3.1). Für die Leistungsmessung wurde in der Vakuumkammer ein Leistungsmesskopf (Ophir 12A-P) im Strahlengang platziert. Durch Verdrehen der $\lambda/2$ Verzögerungsplatte wurde in Abhängigkeit der abgespaltenen Energie am Energiemesskopf PS1 die in der Vakuumkammer ankommende Leistung gemessen. Bild 5.1 zeigt beispielhaft eine Leistungsmessung. Die Fehlerbalken in x- bzw. y-Richtung sind auf Grundlage der Toleranz von $\pm 3 \%$ für $f < 20 \text{ kHz}$ der Energiemessköpfe. Der Determinationskoeffizient R^2 der Regressionsgeraden beträgt 0,99977, was bedeutet, dass die Messung eine geringe Varianz aufweist und somit eine hohe Glaubwürdigkeit besitzt.

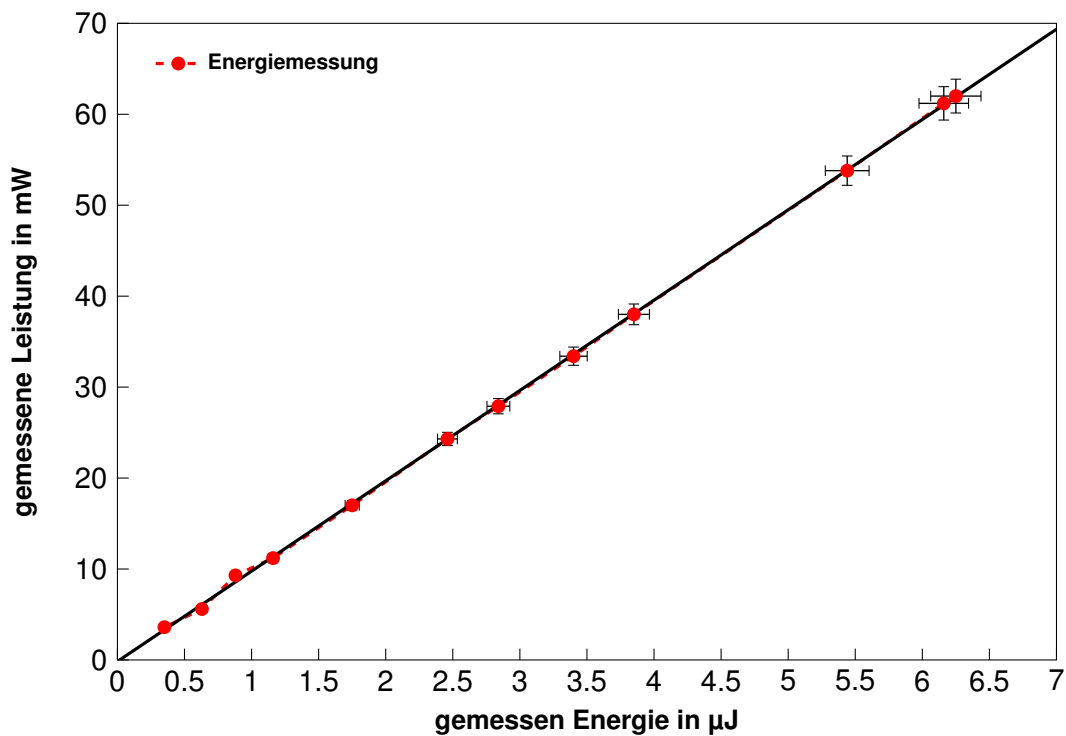


Bild 5.1: Leistungsmessung mit Leistungsmesskopf in Vakuumkammer in Abhängigkeit der abgespaltenen Energie an PS1

Diese Energiemessung wurde bei allen Probenmaterialien jeweils nach den Einfachüberfahrten und nach jeder Leistungsstufe der Mehrfachüberfahrten durchgeführt. Dadurch wurde überprüft ob durch den Ma-

terialabtrag beim Ablationsprozess das Schutzglases beschichtet wurde. Wurde das Schutzglas beschichtet, vermindert sich die ankommende Energie in der Vakuumkammer.

Zur Bestimmung des Fokusbereichs wurde eine Basler acA2000-gm Kamera mittels Adapterplatte auf den Probenhalter montiert. Die Laserleistung wurde durch Verdrehen des $\lambda/2$ Verzögerungsplättchens und mehreren im Strahlengang positionierten Neutralsichtfiltern soweit reduziert, dass eine Übersättigung bzw. Zerstörung des Kameraschips vermieden wurde. Die auf dem Probenhalter befestigte Kamera wurde nun in x-Richtung (längs der Strahlausbreitung) in die vermutete Strahltaillenposition gefahren. Diese liegt in einem Arbeitsabstand von ca. 215 mm von dem am Galvanoscanner angebrachten F- Θ Objektiv [13]. Von dieser Position aus wurden in 0,1 mm Schritten sowohl in positiver, als auch in negativer x-Richtung jeweils 15 Messpunkte, sowie 15 Messpunkte außerhalb der Strahltaillenposition in 0,5 mm Schritten aufgenommen. Insgesamt wurde der Laserstrahl auf einer Länge von 10 mm mit der Kamera durchfahren. In Bild 5.2 sind die gemessenen Strahldurchmesser in horizontaler und vertikaler Richtung sowie ein dazugehöriger Fit auf Grundlage der Formel 5.1 in Abhängigkeit der Rayleighlänge z_R und der Ausbreitungsrichtung z dargestellt [6].

$$\omega_0^2(z) = \omega_0^2 \left(1 + \frac{z^2}{z_R^2} \right) \quad (5.1)$$

Unter Berücksichtigung der festgelegten Koordinatenachsen aus Kapitel 3.1 lautet die Formel:

$$\omega_0^2(x) = \omega_0^2 \left(1 + \frac{(x - x_0)^2}{z_R^2} \right). \quad (5.2)$$

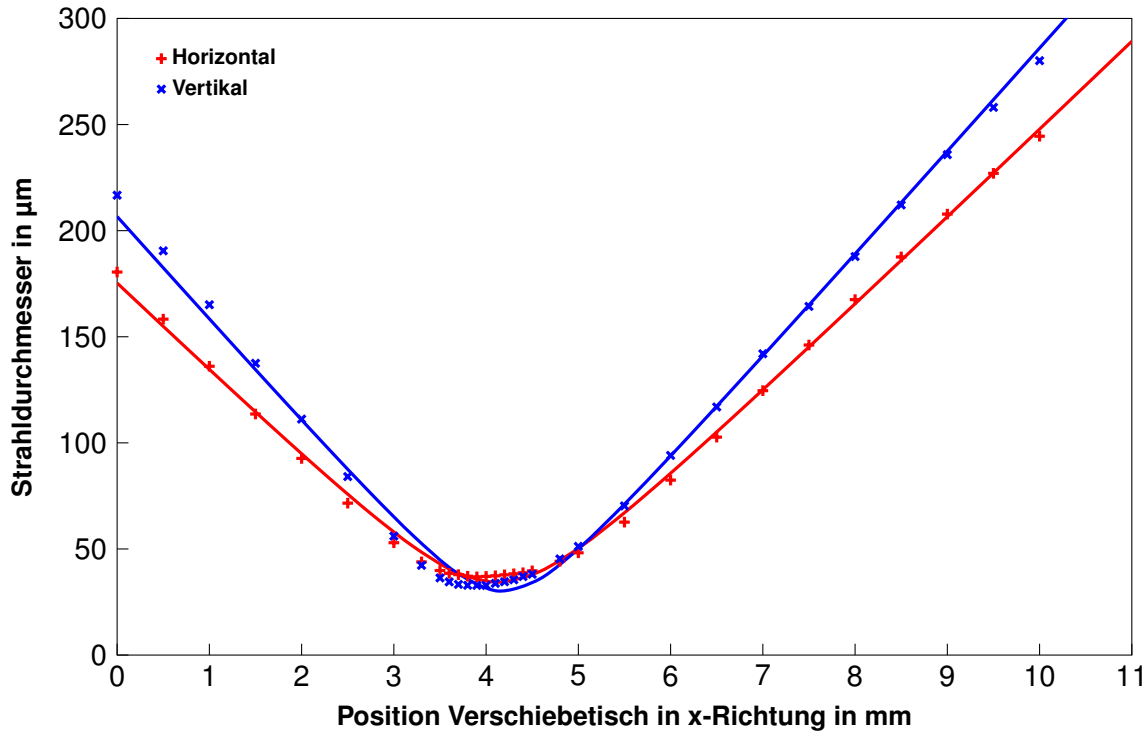


Bild 5.2: Messpunkte aus Strahlvermessung in horizontaler und vertikaler Richtung mit jeweiligem Fit.

Tabelle 5.1 fasst die ermittelten Strahlparameter zusammen. Die Strahlradien unterscheiden sich um circa 14 %. Aus diesem Grund wird bei Berechnung der Spitzenfluenzen (Kapitel 6.1 ff.) der Flächeninhalt einer Ellipse zu Grunde gelegt. Aus der identischen Strahltaillenposition x kann geschlussfolgert werden, dass der Laserstrahl keinen Astigmatismus aufweist. Die Beugungsmaßzahl wurde aus den gemessenen Parametern berechnet.

| | | horizontal | vertikal |
|------------|---------------|-------------------|-------------------|
| x | mm | $4,12 \pm 0,017$ | $4,18 \pm 0,024$ |
| ω_0 | μm | $17,16 \pm 0,42$ | $15,03 \pm 0,81$ |
| z_r | mm | $0,822 \pm 0,022$ | $0,615 \pm 0,035$ |
| M^2 | - | 1,057 | 1,084 |

Tabelle 5.1: Zusammenfassung der ermittelten Strahlparameter: Position der Strahltaille x , Strahlradius ω_0 , Rayleighlänge z_r und Beugungsmaßzahl M^2 .

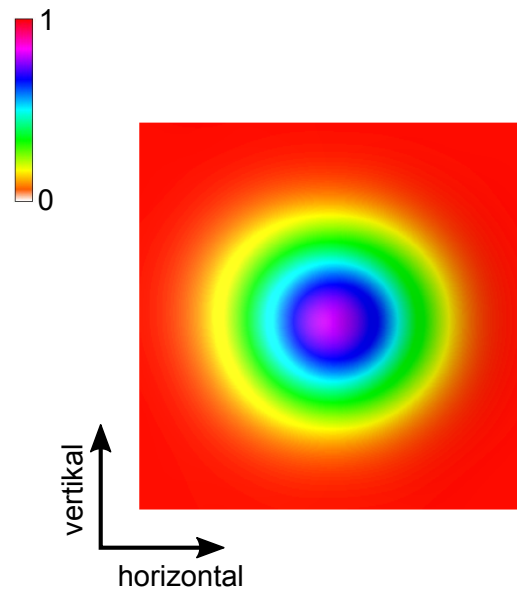


Bild 5.3: Strahlprofil bei $x = 4,1$ mm, aufgenommen mit Basler acA2000-50gm. Nicht maßstäblich skaliert.

5.2 Ablationsmuster und Probenaufbau

Die verwendeten Probenmaterialien für die durchgeführten Experimente sind Gold, Aluminium und Kupfer. Dabei betragen die Abmaße der Aluminum- und Kupferprobe 25x25 mm, die der Goldprobe 20x20 mm. Die Größe eines Ablationsfeldes beträgt 1x1 mm (in Anlehnung an [5]). Des Weiteren wurden in der Arbeit vornehmlich Mehrfachüberfahrten durchgeführt, da deren Bedeutung für die Realisierung der Laser-ablativen Mikroantriebe einen höheren Stellenwert haben.

Bild 5.4 zeigt die schematische Darstellung des Ablationsmusters einer Überfahrt innerhalb des Ablationsfeldes. Der Spotabstand Δx wurde von 36 μm bis 12 μm verringert, was Pulsüberlapp (PU) einem von 10 % bis 70% entspricht.

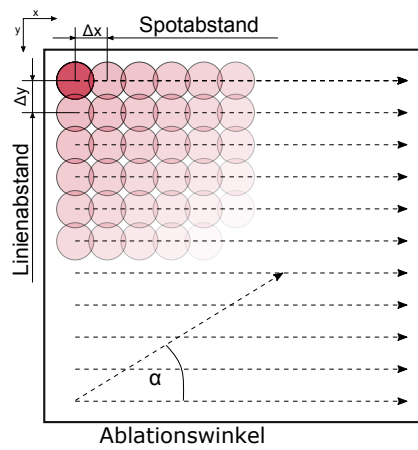


Bild 5.4: Schematische Darstellung des Ablationsmuster innerhalb eines 1x1 mm Näpfchens [18].

Der Spotabstand Δx wurde in der Software laserDESK (Version 1.0.8) durch Verändern der Markiergeschwindigkeit v_m nach Formel 5.3 eingestellt. Hierbei ist f die Repetitionsrate der Laserquelle. Der vertikale Linienabstand Δy wurde direkt durch Eingabe des gewünschten Linienabstandes eingestellt.

Ausgehend von der ersten Überfahrt innerhalb eines Ablationsfeldes bei einem Ablationswinkel von $\alpha=0^\circ$ wurden darauffolgend der Ablationswinkel für die weiteren Überfahrten in 10° Schritten bis 170° erhöht. Insgesamt werden 18 Schichten pro Ablationsfeld bei den Einfachüberfahrten abgetragen.

$$v_m = f \cdot \Delta x \quad (5.3)$$

Bild 5.5 zeigt eine schematische Darstellung der Aufteilung einer Probe mit deren durchgeführten Experimenten.

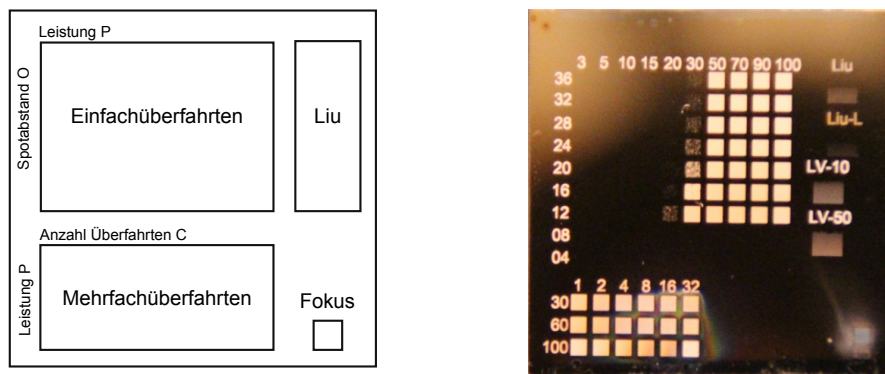


Bild 5.5: Links: Schematische Darstellung des Probenaufbaus, Rechts: Beispielhaftes Muster für Kupfer.

Links oben sind die Experimente der Einfachüberfahrten angeordnet (Kapitel 6.2). Horizontal wird die Leistung P in % der Laserleistung (3 % - 100 %) erhöht. Vertikal nach unten nimmt der Spotabstand ausgehend von 36 μm bis 12 μm ab. Auf dem beispielhaften Bild der Kupferprobe sind noch die Spotabstände 8 μm und 4 μm zu sehen. Die dazugehörigen Experimente wurden aber Aufgrund der begrenzten Versuchszeit nicht durchgeführt. In der Bezeichnung der Auswertungsdaten ist die Leistung mit dem Kürzel P (Power) und der Spotabstand mit O (Overlap) vermerkt. Alle produzierten Daten aus diesem Experiment sind nach folgendem Schema bezeichnet: Datum_Material_Probennummer_Leistung_Spotabstand.

Links unten sind die Mehrfachüberfahrten angeordnet (Kapitel 6.2). Alle Ablationsfelder wurden mit einem konstanten Spotabstand von 12 μm bearbeitet. Horizontal nach der Anzahl der Überfahrten in Bezug auf eine Einfachüberfahrt aufgetragen. Auf der vertikalen Achse steigt die Leistung P in % der Laserleistung. Die Mindestleistungen der Mehrfachüberfahrten wurden in Abhängigkeit der vermuteten Ablationsschwelle des jeweiligen Materials anhand der Einfachüberfahrten gewählt. In der Datenbezeichnung ist die Leistung mit dem Kürzel P und die Überfahrten mit C (Cycles) vermerkt. Die Bezeichnung ist wie folgt: Datum_Material_Probennummer_Leistung_Überfahrten.

Rechts oben befinden sich die Liu-Plots (Kapitel 6.1) zur Ermittlung der Ablationsschwelle des Materials. Liu-V bzw. Liu-L bezeichnet einen 1-Puls Liuplot im Vakuum bzw. an Luft. LV-10 bzw. LV-50 bezeichnet einen Liuplot im Vakuum mit einer Pulsanzahl pro Krater von 10 bzw. 50. Das Ablationsfeld entspricht einem 10x10 Raster. Hierbei wird die Leistung P in 5 % Schritten bis 100 % vertikal nach unten gesteigert. Horizontal zur jeweiligen Leistung P werden 10 Pulse in einem Abstand von 0,1 mm geschossen.

Rechts unten befindet sich ein 1x1 mm großes Ablationsfeld welches zur Fokussuche dient.

6 Auswertung der Experimente

6.1 Ermittlung der Ablationsschwelle

Eine experimentell durchführbare Ermittlung der Ablationsschwelle ϕ_{th} stellt die Methode nach Liu dar. [19] Dabei werden für verschiedene Pulsenergien Einzelschusskrater erzeugt und anschließend deren Schädigungsdurchmesser D gemessen. Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, wurden für 20 Laserleistungen jeweils 10 Einzelpuls-Krater in einer Reihe abgetragen. Die Auswertung der Schädigungsdurchmesser erfolgt durch manuelles Messen der Schädigungsdurchmesser mit der Software Fiji. Den Auswertungsprozess zu automatisieren war nicht möglich, da für die einzelnen Krater kein geeigneter Schwellwert zum Maskieren ermittelt werden konnte. Es wurden jeweils fünf Einzelkrater pro Leistung sowohl in vertikaler, als auch in horizontaler Richtung vermessen. Für die weitere Auswertung wurde deren Mittelwert herangezogen.

Die Ermittlung des Spotradius ω_0 erfolgt durch die direkte Abhängigkeit des Schädigungsdurchmessers D und der eingesetzten Pulsenergie E_p nach Formel 6.1 [9].

$$\phi_{th}(D) = \frac{2 \cdot E_p}{\pi \cdot \omega_0^2} \cdot e^{-\frac{D^2}{2 \cdot \omega_0^2}} \quad (6.1)$$

Durch Umstellen der Gleichung 6.1 nach D^2 erhält man die Gleichung 6.2.

$$D^2 = 2 \cdot \omega_0^2 \cdot \ln(2 \cdot E_p) - 2 \cdot \omega_0^2 \cdot \ln(\pi \cdot \omega_0^2 \cdot \phi_{th}) = m \cdot \ln(2 \cdot E_p) + b \quad (6.2)$$

Durch logarithmieren der x-Achse erhalten wir eine lineare Gleichung mit der Steigung m und dem y-Achsenabschnitt b . Die Ablationsschwelle ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der x-Achse nach Formel 6.3

$$\phi_{th} = e^{-\frac{b}{m}} \quad (6.3)$$

Der Fokusradius ω_0 kann aus der Steigung m der Regressionsgeraden nach 6.4 ermittelt werden.

$$\omega_0 = \sqrt{2 \cdot m} \quad (6.4)$$

Die Fehlerbalken der quadrierten Spotdurchmesser D^2 wurden aus den jeweiligen Standardabweichungen der Schädigungsradien r_x bzw. r_y und dem gemittelten Schädigungsradius r_{mittel} nach Formel 6.5 berechnet.

$$\Delta D^2 = \sqrt{(2 \cdot Std(r_x))^2 + (2 \cdot Std(r_y))^2} \cdot 2 \cdot (2 \cdot r_{mittel}) \quad (6.5)$$

Die Fehlerbalken der Spitzenfluenz ϕ_{SP} wurden durch Fehlerfortpflanzung berechnet. Grundlage dieser Berechnung ist die Toleranz des Energiemesskopfes von 3 %, sowie der Fehler des Spotradius.

In Tabelle 6.1 sind REM - Aufnahmen der Einzelpulskrater bei niedrigster (bei der ein Einzelkrater erkennbar ist) und höchster Fluenz dargestellt. Die Aufnahmen für Aluminium und Kupfer wurden am IFSW mit einem REM JEOL JSM-6490LV durchgeführt, Gold wurde am DLR mit einem REM Zeiss EVO MA 10 mikroskopiert. Die Vergrößerung wurden an die jeweiligen Einzelpulskrater angepasst. Deutlich sichtbar sind die bei Gold entstandenen Doppelkrater wegen Aluminium und Kupfer keine eindeutige Doppelkraterbildung aufweisen.

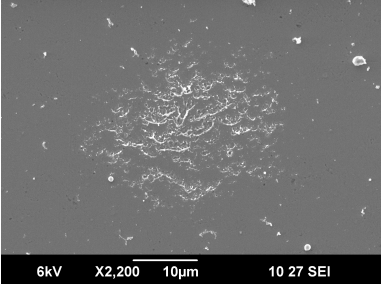
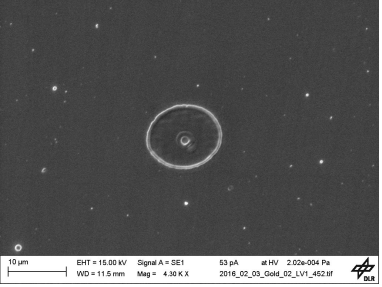
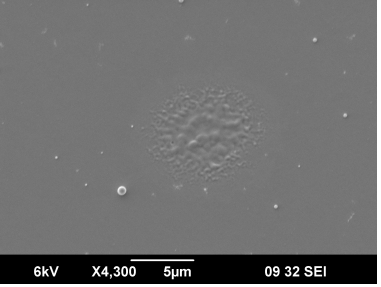
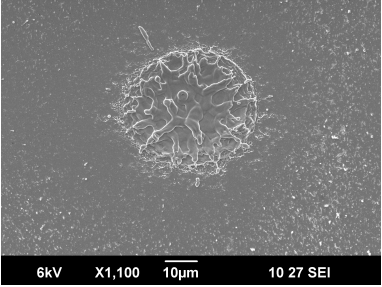
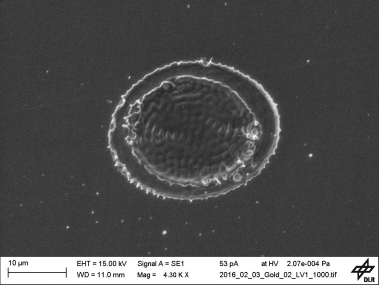
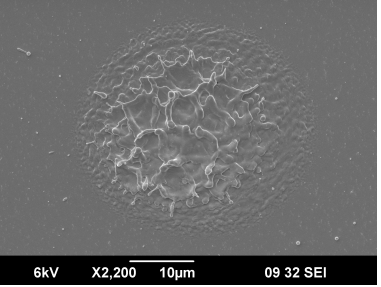
| Aluminium | Gold | Kupfer |
|--|--|--|
| $\phi_{SP} = 1,5 \text{ J/cm}^2$ | $\phi_{SP} = 6,2 \text{ J/cm}^2$ | $\phi_{SP} = 8,9 \text{ J/cm}^2$ |
|  |  |  |
| $\phi_{SP} = 16,0 \text{ J/cm}^2$ | $\phi_{SP} = 15,9 \text{ J/cm}^2$ | $\phi_{SP} = 16,3 \text{ J/cm}^2$ |
|  |  |  |

Tabelle 6.1: REM-Aufnahmen von Einzelpulskratern für Aluminium, Gold und Kupfer jeweils bei niedrigster und höchster Spitzenfluenz, Aufnahmen von Aluminium und Kupfer am IFSW, Gold am DLR.

Im Rahmen der Vermessung des bei Gold entstandenen Doppelkraters wurde der innere Schädigungsdurchmesser d_I und äußere Schädigungsdurchmesser d_A unterschieden. Trotz nicht eindeutiger Doppelkraterbildung bei den Materialien Aluminium und Kupfer wurde versucht d_I und d_A zu bestimmen.

Bei Betrachtung der Profilometrieaufnahmen (Tabelle 6.2) lässt sich vermuten, dass im inneren Krater Material durch Ablation entfernt wurde. Im äußeren Krater ist anzunehmen, dass durch Wärmeleitung eine Aufschmelzung der Oberfläche stattgefunden hat. Das Messen von innerem und äußerem Schädigungsdurchmesser wird beispielhaft in Tabelle 6.2 dargestellt. Dabei wurden die niedrigsten Fluenzen so gewählt, dass ein innerer und äußerer Schädigungsdurchmesser eindeutig zugeordnet werden konnte.

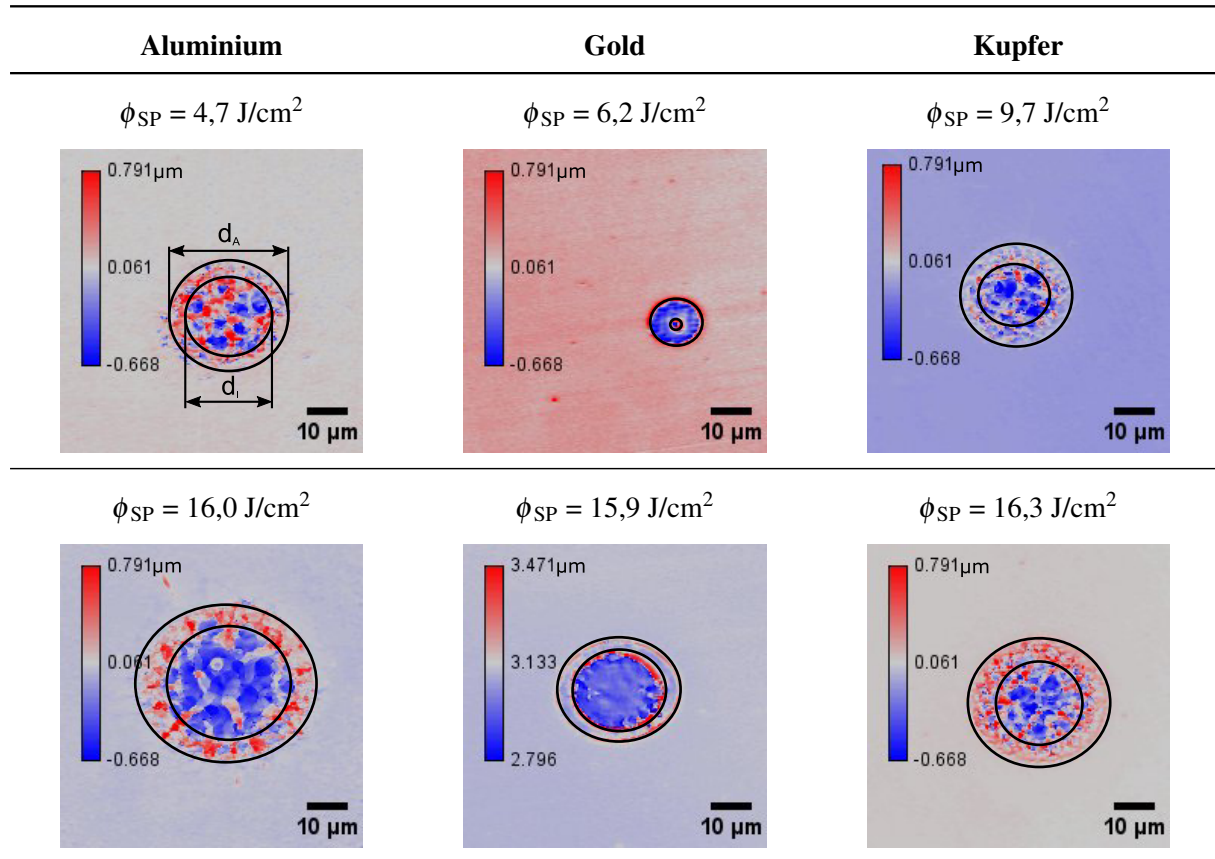


Tabelle 6.2: Profilometer-Aufnahmen von Einzelpulskratern für Aluminium, Gold und Kupfer: Illustration des Messens von Innerem und Äußerem Schädigungsdurchmesser.

Bild 6.1 und 6.2 zeigen die Messpunkte mit den dazugehörigen Regressionsgeraden. Die Einzelpulskrater lassen sich sehr gut durch eine lineare Anpassung (Determinationskoeffizient $\geq 0,9$) nähern. Im Bereich nahe der Ablationsschwelle weichen die Einzelpulskrater der Materialien Aluminium und Kupfer stark von der Regressionsgerade ab, da kein eindeutiger Materialabtrag stattgefunden hat. Weiterhin ist festzustellen, dass sich die Steigungen der Regressionsgeraden unterscheiden was entsprechend Formel 6.4 zu verschiedenen experimentell bestimmten Fokusradien führt.

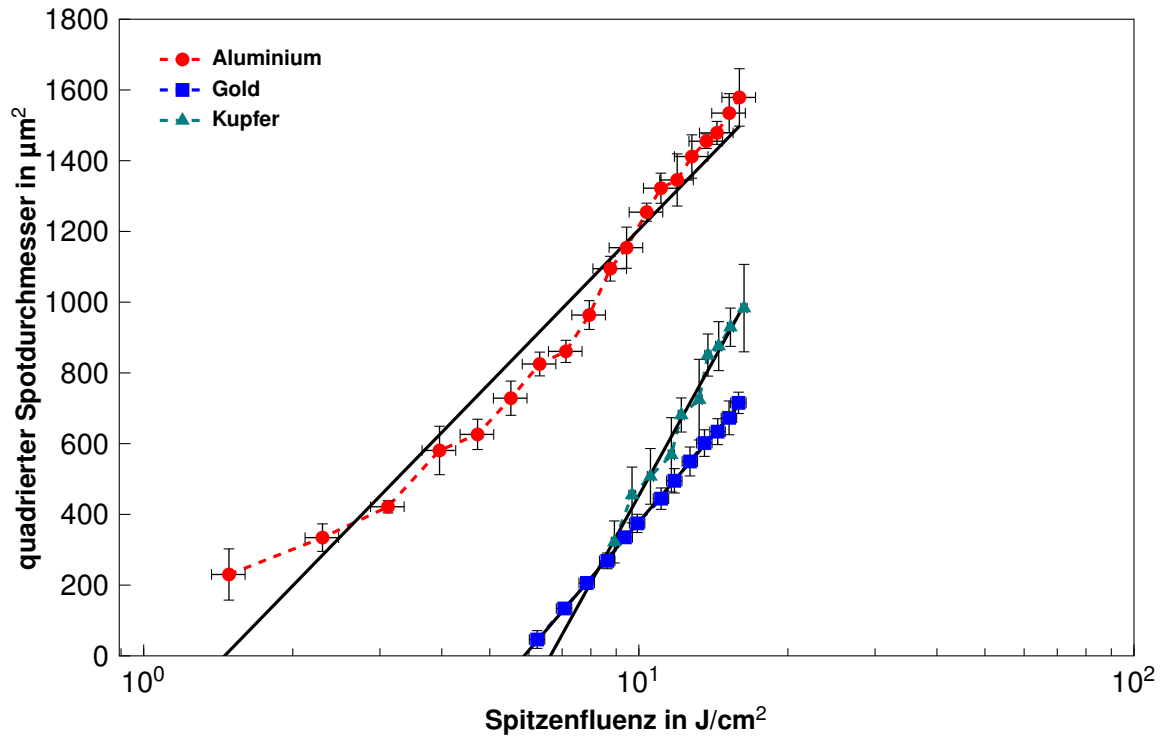


Bild 6.1: Liu-Plots für Aluminium, Gold und Kupfer in Vakuum, Einzelpuls, Manuelle Messung des Außendurchmessers.

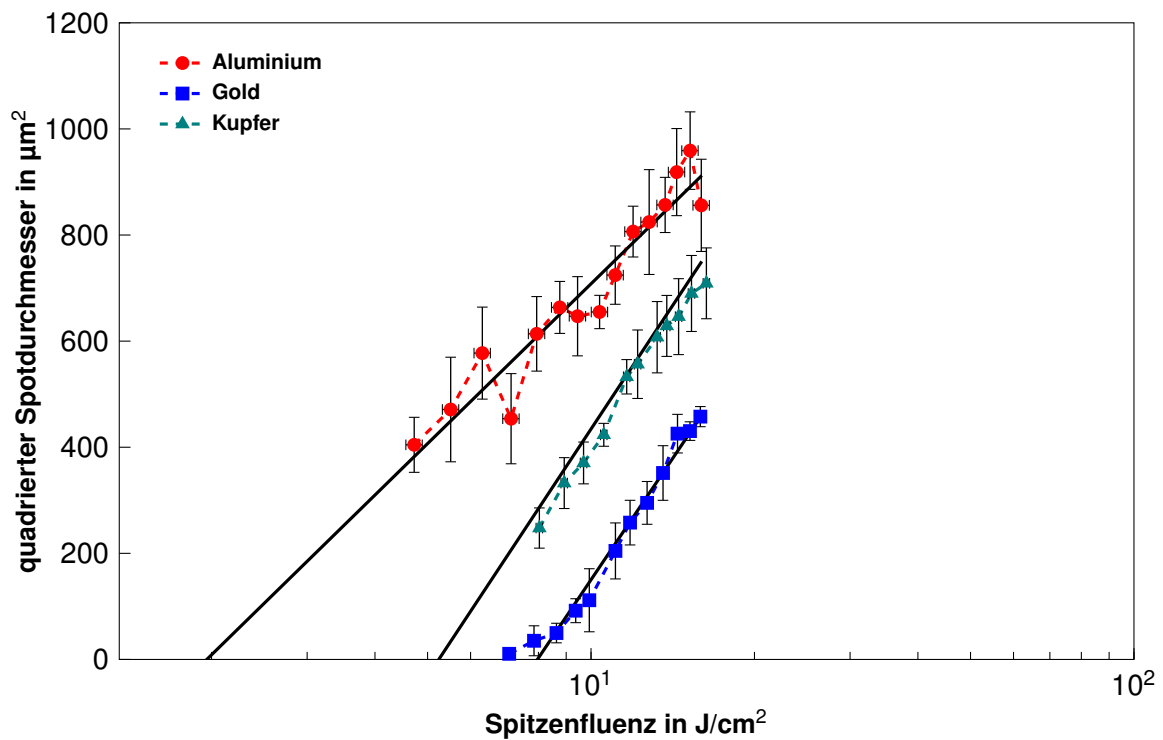


Bild 6.2: Liu-Plots für Aluminium, Gold und Kupfer in Vakuum, Einzelpuls, Manuelle Messung des Innendurchmessers.

Betrachtet man die in Bild 6.1 und 6.2 dargestellten Fehlerbalken für Aluminium und Kupfer, weisen die Fehlerbalken der inneren Schädigungsdurchmesser eine höhere Varianz als die Fehlerbalken der äußeren Schädigungsdurchmesser auf. Dies bestätigt nochmals die Schwierigkeit die beiden Schädigungsdurchmesser eindeutig zu identifizieren.

Zusammenfassend sind die ermittelten Ablationsschwellen Φ_{th} und die Fokusradien ω_0 in Tabelle 6.3 dargestellt. Als Referenz wird der in Kapitel 5.1 ermittelte Strahlradius herangezogen welcher als Plausibilitätsprüfung der berechneten Fokusradien dient. Plausible Fokusradien und die dazugehörigen Ablationsschwellen wurden in diesem Zusammenhang mit einem Stern gekennzeichnet.

| | | Aluminium | Gold | Kupfer |
|------------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| Φ_{th} Außen | J/cm ² | 1,46 ± 0,34 * | 5,87 ± 0,2 * | 6,63 ± 1,13 |
| Φ_{th} Innen | J/cm ² | 1,96 ± 1,76 | 7,97 ± 1,9 | 5,48 ± 1,74 * |
| ω_0 Außen | µm | 17,7 ± 0,39 * | 18,8 ± 0,05 * | 23,5 ± 0,45 |
| ω_0 Innen | µm | 14,7 ± 0,68 | 18,2 ± 0,29 * | 18,3 ± 0,40 * |
| ω_{0h} gemessen | µm | | 17,16 ± 0,42 | |
| ω_{0v} gemessen | µm | | 15,03 ± 0,81 | |

Tabelle 6.3: Ablationsschwelle Φ_{th} und Fokusradius ω_0 nach Liu für Gold, Aluminium und Kupfer, Vergleich mit Fokusradius ω_{0h} und ω_{0v} aus Strahlvermessung.

Beim Vergleich der Ablationsschwellen des inneren und äußeren Schädigungsdurchmessers der Materialien Gold und Aluminium weisen die mit dem inneren Schädigungsdurchmessers berechneten Ablationsschwellen einen höheren Wert auf. Die Ablationsschwellen für Kupfer zeigen ein entgegengesetztes Verhalten. Nach Durchführung der Plausibilitätsprüfung des berechneten Fokusradius auf Basis des äußeren Schädigungsdurchmessers ist festzustellen, dass der berechnete Fokusradius in Bezug auf den gemessenen Fokusradius zu groß ausfällt. Aus diesem Grund stellt die Ablationsschwelle möglicherweise einen realitätsfremden Wert dar. Um dies zu bestätigen müssen weitere Versuchreihen durchgeführt werden. Unter Berücksichtigung der Schädigungsdurchmesser sowie der Profilometrieaufnahmen lässt sich für die Materialien Aluminium und Gold die Annahme treffen, dass die Ablationsschwellen des äußeren Schädigungsdurchmesser d_A einen Indikator für die Oberflächenumwandlung darstellt. Als Indikator für den Materialabtrag lässt sich die Ablationsschwelle unter Einbeziehung des inneren Schädigungsdurchmessers d_I vermuten.

In Bezug auf die Laser-ablativen Mikroantriebe kommt beiden Schwellen eine hohe Bedeutung zu. Da unterhalb der Ablationsschwelle lediglich eine Veränderung des Ra-Wertes, aber kein Materialabtrag stattfindet, ist es nicht möglich einen Schub zu generieren. Dies geschieht erst beim Erreichen der Ablationsschwelle für Materialabtrag.

6.2 Einfachüberfahrten

Im folgenden Kapitel findet die Betrachtung der Einzelüberfahrten bei Variation des Spotabstandes sowie der Fluenz statt. Hierbei wird insbesondere der Volumenabtrag V_{abl} und die Oberflächengüte Ra untersucht.

Für die Fehlerabschätzung der Volumina und der Ra-Werte wurde der definierte Messbereich des Makros Volumen.ijm in neun Quadrate unterteilt. Im nächsten Schritt wird für jedes Quadrat der Ra-Wert, die mittlere Ablationstiefe und deren Standardabweichung bestimmt. Folgend werden aus der Standardabweichung der einzelnen Ra-Werte der neun Quadrate die Fehlerbalken eines Ablationsfeldes bestimmt. Für die Fehlerbalken der Volumina wurde ein relativer Fehler über die mittlere Ablationstiefe und deren Standardabweichung nach Formel 6.6 berechnet. V_{Abl} ist hierbei das berechnete Volumen aus dem Makro „Volumen.ijm“.

$$f_{rel} = V_{Abl} \cdot \left(\frac{Std_z}{z_{mean}} \right) \quad (6.6)$$

Die Fehlerbetrachtung des Spotabstandes wird durch die Positioniergenauigkeit des Galvanometerscanners von ca. 1 μm nicht weiter berücksichtigt [11]. Tritt ein systematischer Fehler auf kann dieser auch außer acht gelassen werden, da er sich auf alle Ergebnisse gleichermaßen auswirkt. Analog hierzu wurde die Fehlerbetrachtung bei den Mehrfachüberfahrten vorgenommen.

6.2.1 Oberfläche

Bild 6.3 zeigt den Oberflächenrauheitswert R_a über den Spotabstand bei ausgewählten Spitzenfluenzen für Aluminium. Zusätzlich sind als vertikale Linien die Schädigungsdurchmesser d_s für ausgewählte Spitzenfluenzen, die dem Liu-Plot aus Kapitel 6.1 entnommen wurden, eingezeichnet. Dem Bild ist zum einen zu entnehmen, dass der R_a -Wert bei einem Spotabstand von $\Delta x = 36 \mu\text{m}$ mit zunehmender Spitzenfluenz ansteigt, des weiteren verringert sich der R_a -Wert mit Abnahme des Spotabstandes und nimmt bei einem Spotabstand von $\Delta x = 12 \mu\text{m}$ einen nahezu konstanten R_a -Wert für alle Spitzenfluenzen an.

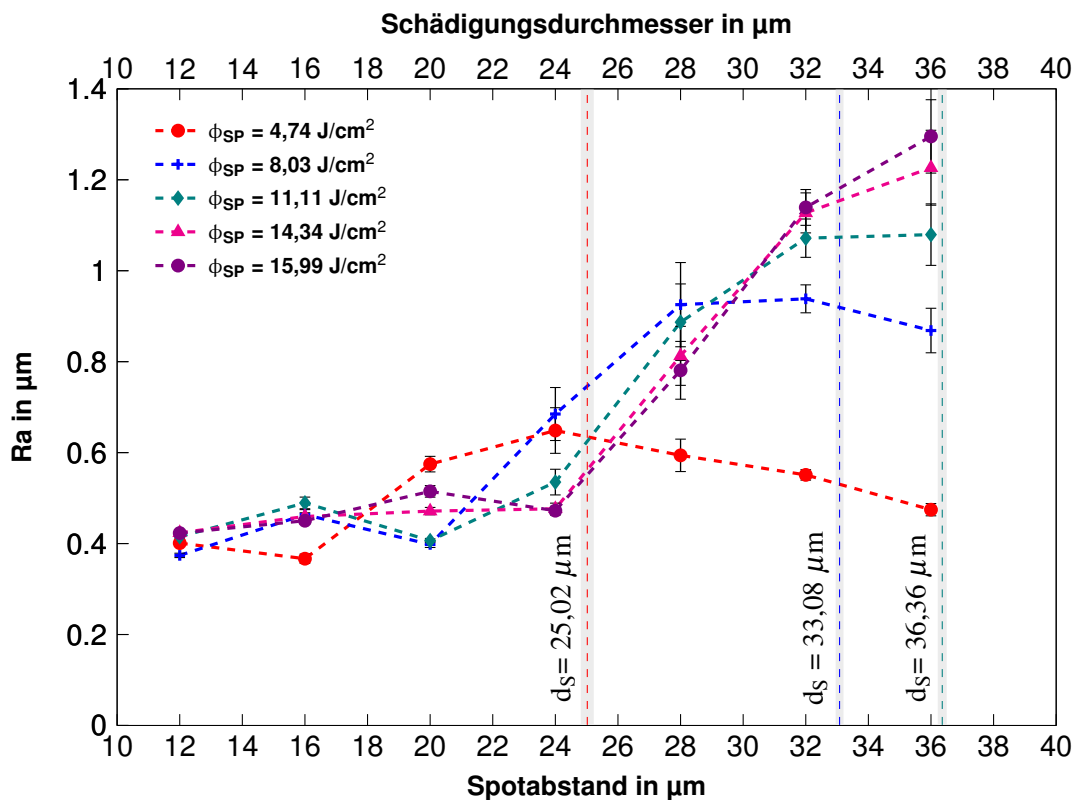


Bild 6.3: Einfachüberfahrenen Aluminium: R_a - Wert über Δx Spotabstand bei verschiedenen Spitzenfluenzen. Vertikale Linien zeigen die Schädigungsradien bei ausgewählten Spitzenfluenzen aus Liu - Plot.

Der Anstieg der R_a -Werte mit steigender Spitzenfluenz bei großem Spotabstand kann durch das Ablationsverhalten in Zusammenhang mit den entstandenen Schädigungsradien begründet werden. Zunächst wird Zeile eins der Tabelle 6.4 analysiert. Das erste Feld (links) zeigt einen vertikaler Schnitt durch zwei Laserpulse mit dem Spotdurchmesser d_f und dem Schädigungsdurchmessers d_s bei einem Spotabstand von $\Delta x = 36 \mu\text{m}$. Die darauf folgenden drei Felder zeigen vier Laserpulse in der Draufsicht. Die Bereiche, innerhalb derer eine Ablation stattgefunden hat sind rot eingefärbt, unbearbeitete Bereiche blau. Der Schädigungsdurchmesser d_s vergrößert sich mit steigender Spitzenfluenz, so dass sich im weiteren drei Fälle unterscheiden lassen. Bei niedrigen Spitzenfluenzen ist der Schädigungsdurchmesser d_s kleiner als der Spotdurchmesser d_f . Eine Ablation findet nur in einem Bereich statt, welcher kleiner als der Spotdurchmesser ist. Durch den Spotabstand von $\Delta x = 36 \mu\text{m}$ sind größere Bereiche des Ablationsfeldes noch unbearbeitet. Dies hat zur Folge, dass die unablatierte polierte Oberfläche der Probe den R_a -Wert dominiert was bei niedrigen Fluenzen zu einem geringen R_a -Wert führt.

Unter der Annahme von $d_s = d_f$ vergrößern sich die ablatierten Bereiche und mehr Material wird abgetragen. Bedingt durch den hohen Spotabstand bleiben dennoch unbearbeitete Bereiche zwischen den einzelnen Pulsen zurück. In diesem Fall wird die Oberflächengüte von der Ablationstiefe der Einzelpuls-krater bestimmt.

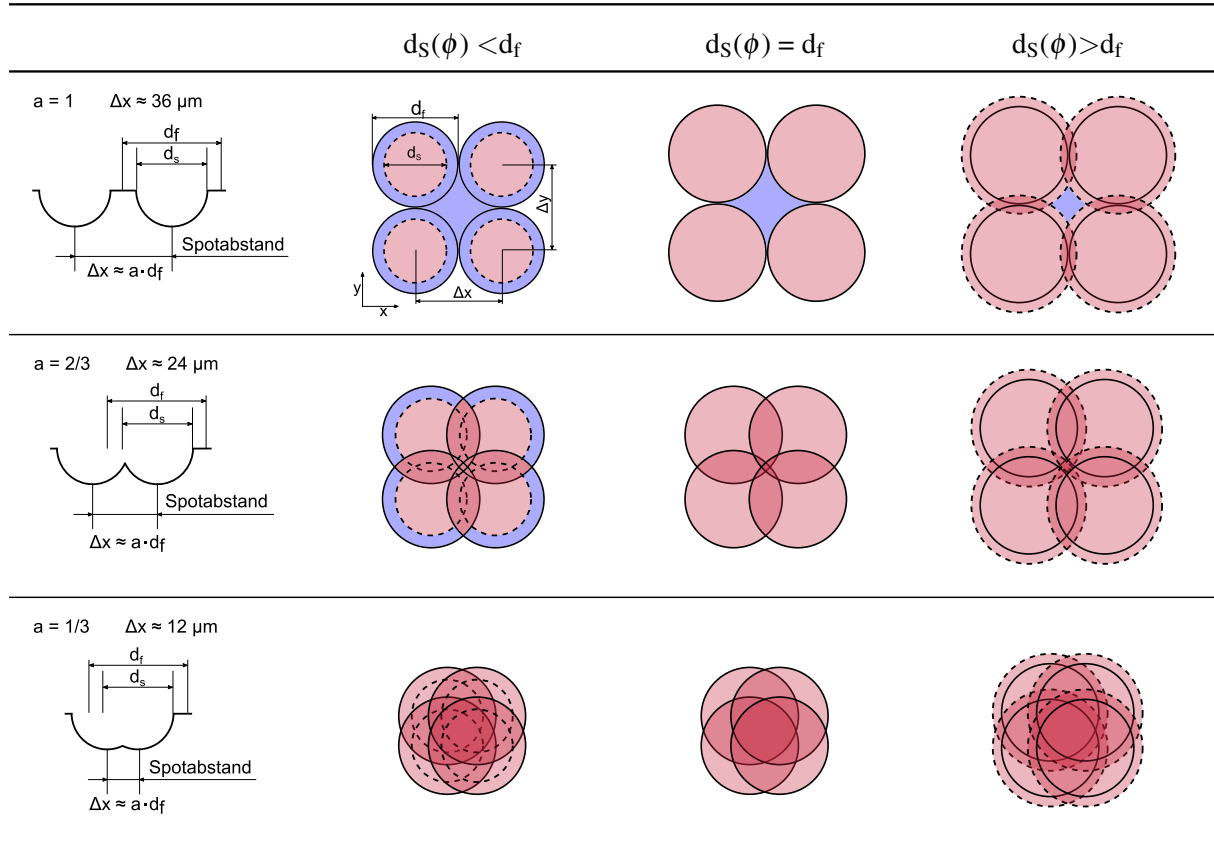


Tabelle 6.4: Links: Frontansicht von einem vertikalen Schnitt durch zwei Einzelpulskrater mit Spotdurchmesser d_f und d_s bei Spotabständen $\Delta x = 36 \mu\text{m}$, $\Delta x = 24 \mu\text{m}$ und $\Delta x = 12 \mu\text{m}$. Rechts: Draufsicht der drei verschiedenen Fälle des Ablationsverhalten in Abhängigkeit von Schädigungsdurchmesser d_s und Spotabstand Δx .

Der letzte Fall zeigt bei hohen Spitzenfluenzen einen Schädigungsdurchmesser d_s der größer ist als der Spotdurchmesser d_f . Bei diesen Bearbeitungsbedingungen vergrößert sich der ablatierte Bereich und die Ablationstiefe der Einzelpulse nimmt zu. In der Mitte verbleibt dennoch ein unablatierter Bereich, was einen zunehmend von der Ablationstiefe der Einzelpulse bestimmten Ra-Wert zur Folge hat.

Bei einem Spotabstand von $\Delta x = 24 \mu\text{m}$ und einem Schädigungsdurchmesser d_s kleiner als der Spotdurchmesser d_f sind nur noch die Randbereiche unablatiert. Mit zunehmender Spitzenfluenz vergrößern sich auch hier die Schädigungsradien und der Ra-Wert wird zunehmend von der ablatierten Bodenfläche eines Ablationsfeldes bestimmt.

Bei kleinstem Spotabstand von $\Delta x = 12 \mu\text{m}$ sind selbst bei niedrigsten Spitzenfluenzen keine unablatierten Bereiche mehr vorhanden. Der Ra-Wert wird ausschließlich von der Oberflächenbeschaffenheit des Ablationsfeldes bestimmt.

Durch die gewonnen Erkenntnisse aus dem fluenzabhängigen Schädigungsdurchmesser (6.4) und dem Verlauf des Ra-Wertes von Aluminium (6.3) kann eine Korellation der Schädigungsdurchmesser mit den links der Modulation auftretenden Minima der Spotabständen abgeleitet werden.

Der beschriebene Effekt bezieht sich auf eine Überfahrt unter einem festen Ablationswinkel. Werden im Weiteren 18 Überfahrten mit Erhöhung des Ablationswinkel in 10° Schritten durchgeführt, überlappen die Einzelspots bei großen Spotabständen nur partiell. Dies könnte zur Folge haben, dass das Ablationsmuster diagonale Lücken aufweist, welche den Ra-Wert erhöhen [18]. Dieses Verhalten deckt sich mit den Hatching-Simulationen aus [18] und den vorangegangenen Experimenten [11].

Analog ist der Anstieg des Ra-Wertes bei hohen Spotabständen bei Kupfer und Gold festzustellen (Bild 6.4 und 6.5). Des Weiteren weisen die beiden Materialien bei einem Spotabstand von $20\text{ }\mu\text{m}$ eine Oberflächengüte auf, die unabhängig von ihrer Spitzenfluenz ist. Aluminium zeigt dieses Verhalten bei einem Spotabstand von $12\text{ }\mu\text{m}$. In Kapitel 5.2 wurden der Spotabstand der Mehrfachüberfahrten auf $12\text{ }\mu\text{m}$ festgelegt. Auf Grund der hier gewonnen Erkenntnisse, ist die Wahl des Spotabstandes bei Mehrfachüberfahrten für Kupfer und Gold nicht ideal gewählt. Ein fluenzunabhängiger Ra-Wert bei fixem Spotabstand stellt in Bezug auf die Laser-ablativen Mikroantriebe ein interessantes Prozessfenster dar. Für weitere Experimente sollte deshalb das Ablationsverhalten von Kupfer und Gold bei Mehrfachüberfahrten bei einem Spotabstand von $20\text{ }\mu\text{m}$ untersucht werden.

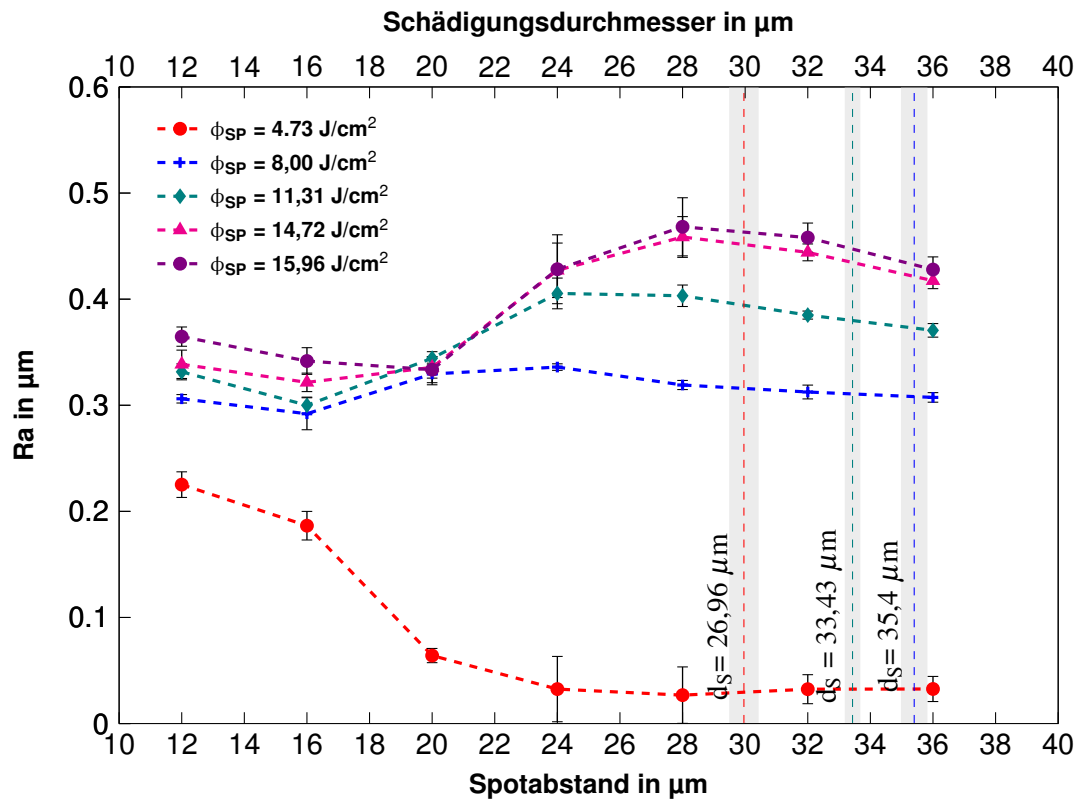


Bild 6.4: Einfachüberfahrten Kupfer: Ra - Wert über Spotabstand Δx bei verschiedenen Spitzenfluenzen. Vertikale Linien zeigen die Schädigungsradien bei ausgewählten Spitzenfluenzen aus Liu - Plot.

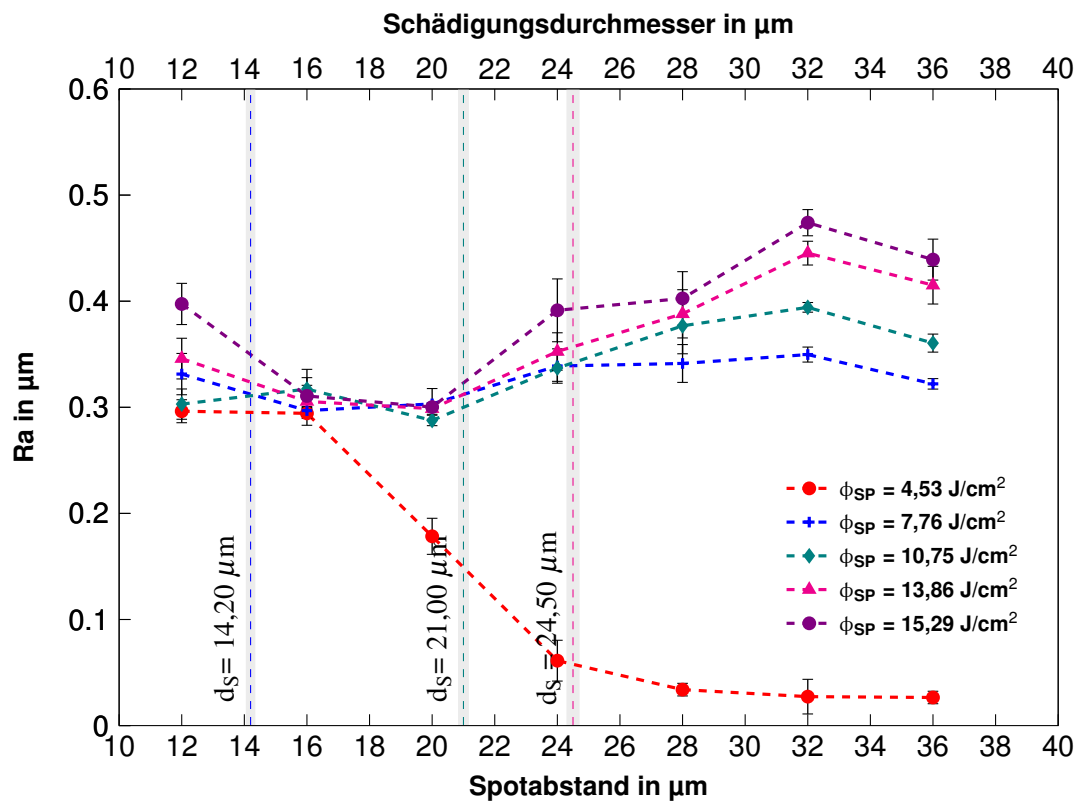


Bild 6.5: Einfachüberfahrenes Gold: Ra - Wert über Spotabstand Δx bei verschiedenen Spitzenfluenzen. Vertikale Linien zeigen die Schädigungsradien bei ausgewählten Spitzenfluenzen aus Liu - Plot.

6.2.2 Volumen

Bei Betrachtung des abgetragenen Volumens in Abhängigkeit der Spitzenfluenz bei verschiedenen Spotabständen für Aluminium in Bild 6.6 ist zu sehen, dass bei niedrigen Spitzenfluenzen nahe der Ablationsschwelle für alle Spotabstände nahezu kein Materialabtrag stattfindet. Vermutlich ist das Absorptionsverhalten der polierte Werkstückoberfläche nicht ausreichend, respektive die Energieeinkopplung, um einen Materialabtrag zu ermöglichen. Werden nun die Spitzenfluenzen erhöht, so bildet sich ein definiertes Ablationsfeld aus und mit steigender Spitzenfluenz erhöht sich das ablatierte Volumen. Dies könnte auf eine Oberflächenstrukturumwandlung hindeuten, welche die Absorption des Laserstrahls positiv beeinflusst. Vergleicht man die Messpunkte für einen Spotabstand von 12 μm mit 16 μm so ist festzustellen, dass im Bereich von $\sim 2,8 - 6,8 \text{ J/cm}^2$ der Volumenabtrag bei 12 μm Spotabstand sprunghaft ansteigt und anschließend abflachend weiter verläuft. Der gleiche sprunghafte Anstieg des Volumenabtrages kann bei 16 μm Spotabstand im Bereich von $\sim 2,8 - 4 \text{ J/cm}^2$ festgestellt werden.

Ein ähnliches Verhalten zeigen auch die Probematerialien Gold und Kupfer (vgl. Anhang B). Im Weiteren wird das energiespezifische Volumen V_E untersucht.

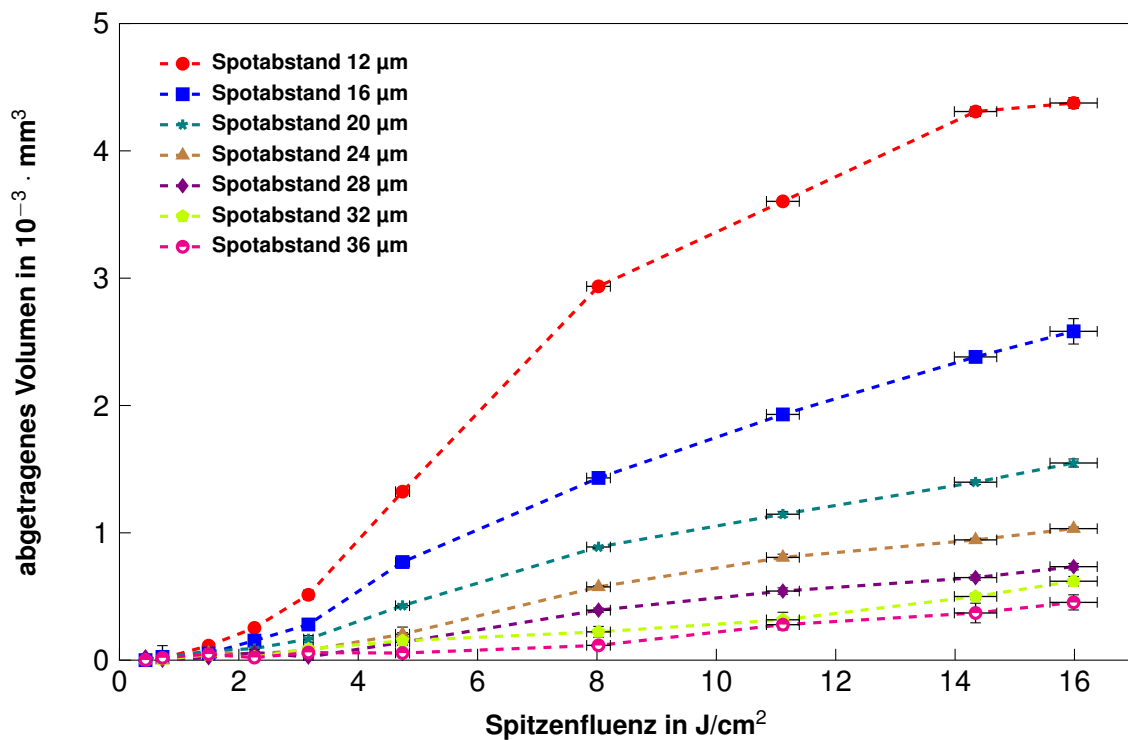


Bild 6.6: Aluminium Einfachüberfahren: Spitzenfluenz über abgetragenes Volumen bei verschiedenen Spotabständen

6.2.3 Energiespezifisches Volumen

Bild 6.7 zeigt das energiespezifische Volumen über der Spitzenfluenz bei ausgewählten Spotabständen für Aluminium. Zu sehen ist, dass für große Spotabstände und Fluenzen nahe der Ablationsschwelle die Messwerte eine große Schwankung aufweisen. Bei einer Spitzenfluenz von $\sim 8 \text{ J/cm}^2$ erreicht das energiespezifische Volumen V_E bei einem Spotabstand von $12 \mu\text{m}$ seinen Maximalwert. Aus Sicht der Materialbearbeitung stellt dieser Punkt den höchsten Prozesswirkungsgrad dar. Interessant ist zudem, dass bei Spitzenfluenzen von $\sim 16 \text{ J/cm}^2$ das energiespezifische Volumen V_E nahezu unabhängig von dem eingestellten Spotabstand ist. Kupfer weist jedoch bei hohen Fluenzen keine Tendenz zu einem spotunabhängiges V_E auf (vgl. Bild 6.8).

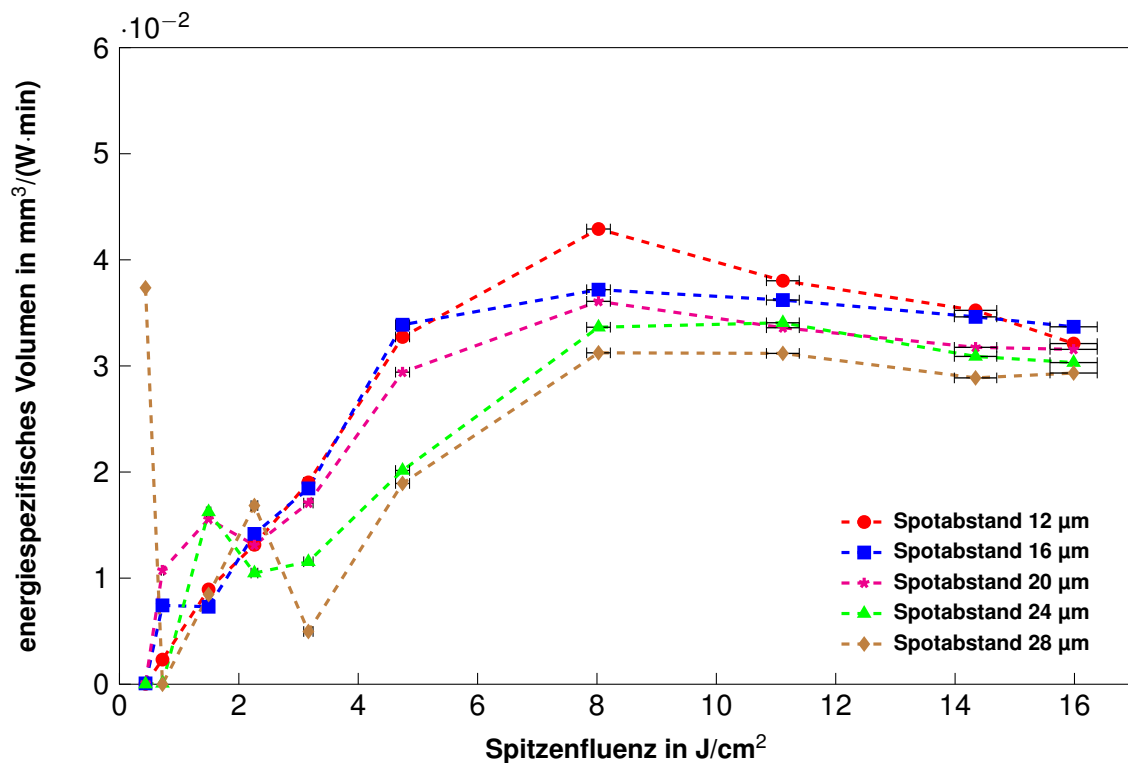


Bild 6.7: Energiespezifisches Volumen über Fluenz für Aluminium bei Einfachüberfahrten

Gleiches Verhalten ist bei Betrachtung des Verlaufes der Kurven von Gold in Bild 8.7 (Anhang C) zu sehen, mit dem Unterschied das Gold seinen Maximalwert bei $20 \mu\text{m}$ Spotabstand erreicht. Unter zu Hilfenahme eines nichtlinearen Ausgleichs mittels Gleichung 2.8 wurde versucht die Ablationsschwelle ϕ_{th} und die Energieeindringtiefe δ zu bestimmen. In diesem Zusammenhang konnten jedoch keine geeigneten Fit-Parameter definiert werden um eine Funktion an die gegebenen Messpunkte anzugleichen. Bei Verwendung eines 10 ps Lasersystems ist eine Anpassung mit diesem Modell sehr wohl möglich [11]. Es kann angenommen werden, dass sich das Modell für die verwendete Pulslänge nicht eignet. In [11] konnte eine Verringerung der Ablationsschwelle ϕ_{th} bei Einfachüberfahrten nachgewiesen werden. Vermutlich sind nicht nur die Materialeigenschaften ein maßgebender Parameter der Ablationsschwelle, vielmehr spielt auch der Bearbeitungsprozess eine Rolle. Ein möglicher Grund könnte eine Mehrfachreflexion des Laserstrahls an der bearbeiteten („angerauten“) Oberfläche sein. Um dies zu verifizieren müssen in Folgeexperimenten weitere Daten erhoben werden.

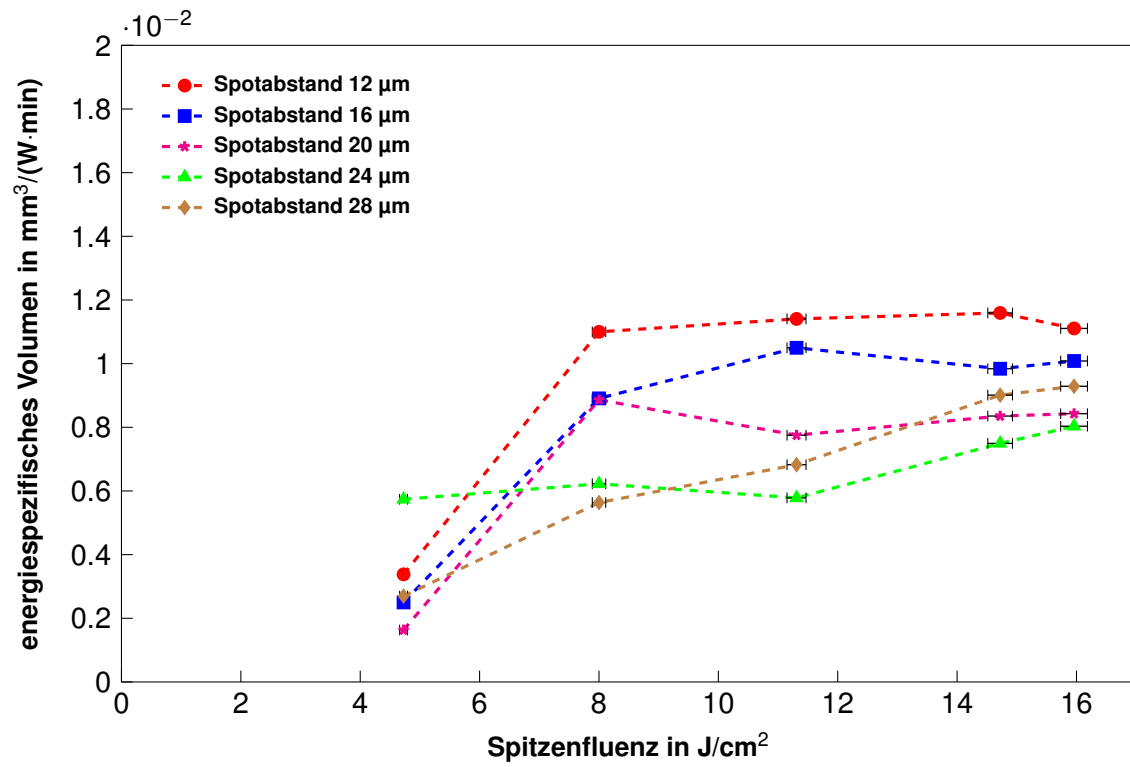


Bild 6.8: Energiespezifisches Volumen über Fluenz für Kupfer bei Einfachüberfahrten.

6.3 Mehrfachüberfahrten

Bei der Ablation der Mehrfachüberfahrten wurde vor Beginn und nach Beendigung einer Leistungsstufe eine Leistungsmessung durchgeführt. Auf diese Weise konnte festgestellt werden, ob das Schutzglas durch den Ablationsprozess beschichtet wurde und in der Folge zu einer Abnahme der Fluenz führte. Sofern ein Beschichtungseffekt auftrat wurde der Leistungsverlust ermittelt und eine Anpassung an die neuen Bearbeitungsbedingungen vorgenommen. War es nicht mehr möglich eine Leistungsanpassung vorzunehmen wurde das Schutzglas ausgetauscht. Ein Beschichtungseffekt konnte bei Gold und Kupfer festgestellt werden. Das Schutzglas bei der Ablation von Aluminium wies über die gesamte Bearbeitungszeitraum keinen Beschichtungseffekt auf. Die detaillierte Betrachtung der Leistungsabnahme findet innerhalb der Volumenauswertung in Kapitel 6.3.2 statt.

6.3.1 Oberfläche

Bild 6.9 zeigt den Ra-Wert über der Abtragstiefe des Ablationsfeldes bei ausgewählten Laserleistungen für Aluminium. Für niedrige Abtragstiefen ($< 10 \mu\text{m}$) wirkt sich eine geringe Erhöhung der Abtragstiefe stark auf den daraus resultierenden Ra-Wert aus. Ab einer Abtragstiefe von $15 \mu\text{m}$ und einer Laserleistung $\geq 50 \%$ ist zu sehen, dass der Ra-Wert auch bei hohen Abtragstiefen nur in geringem Maße ansteigt. Betrachtet man die Profilometrieaufnahmen in Bild 6.10 bestätigen diese den Verlauf des Ra-Wertes. Bei niedrigen Laserleistungen von 5-10 % sind deutlich feinere Oberflächenstrukturen zu erkennen. Erst ab einer Laserleistung von 20 % vergrößern sich mit Zunahme der Überfahrten die Oberflächenstrukturen der Ablationsfelder. Vergleicht man die Oberflächenstrukturen bei 50 % und 100 % Laserleistung, so ist der ansteigende Verlauf des Ra-Wertes mit Zunahme der Abtragstiefe durch die größeren Oberflächenstruktur begründbar (vgl. Bild 6.10). Aus den REM-Aufnahmen der Materialien für ausgewählte Laserleistungen und steigende Anzahl der Überfahrten (Anhang D) können keine genauen Aussagen auf die Oberflächenstrukturen getroffen werden. Es ist lediglich eine Vergrößerung der Strukturen bei Aluminium und Kupfer mit steigender Laserleistung unabhängig von der Anzahl der Überfahrten zu erkennen. Gold weist bei allen Bearbeitungsparametern ein gleichbleibendes Oberflächenstrukturbild auf.

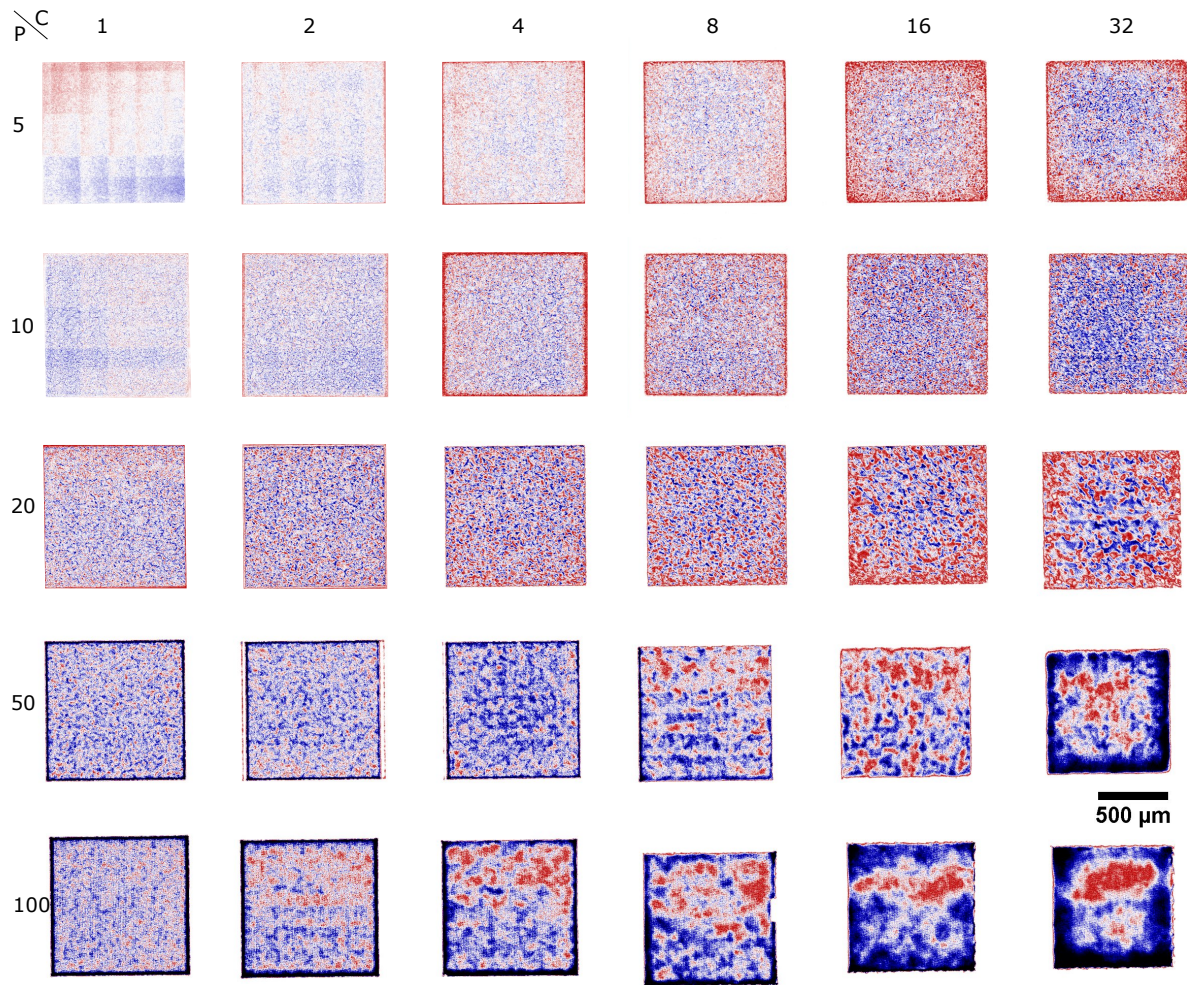


Bild 6.10: Profilometrieaufnahmen der Mehrfachüberfahrten für Aluminium.

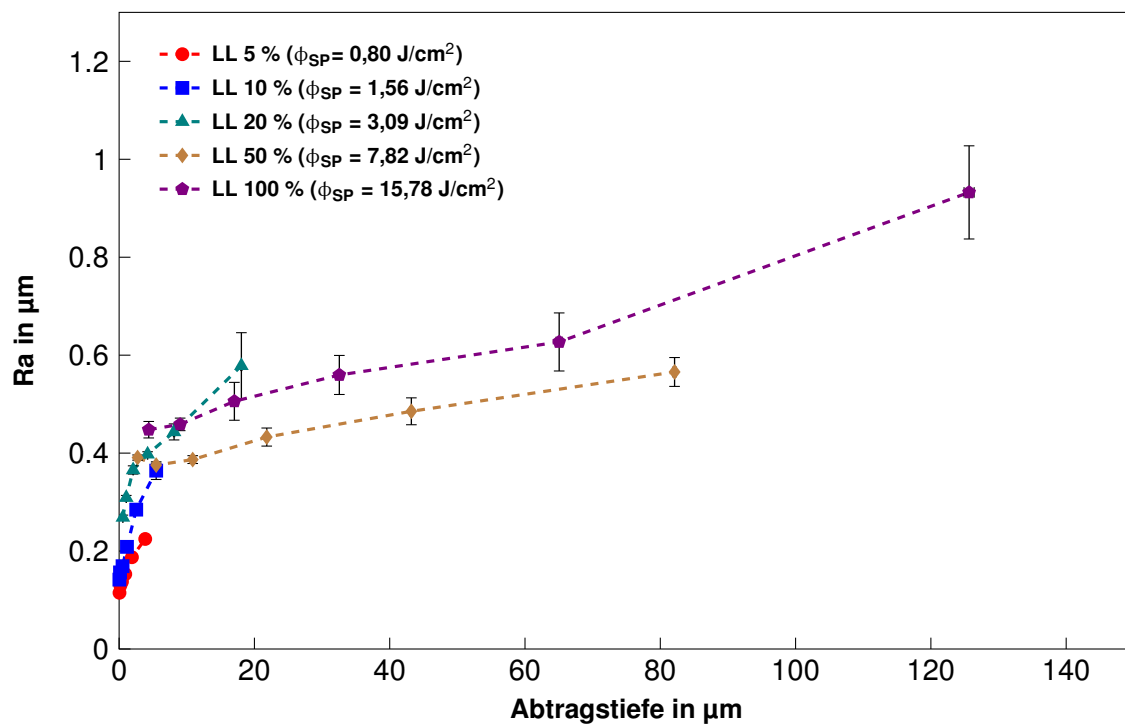


Bild 6.9: Aluminium Mehrfachüberfahrten: Ra-Wert über Abtragstiefe des Ablationsfeldes für verschiedene Laserleistungen.

Bei Vergleich der Oberflächenstrukturen mit Kupfer (Bild 6.11 und 6.12) ist zu erkennen, dass sich schon bei niedrigen Laserleistungen eine deutlich sichtbare grobe Kristallstruktur ausbildet. Der Folgeeffekt ist ein Anstieg des Ra-Wertes. Des Weiteren ist dem Verlauf der Kurven zu entnehmen, dass der Ra-Wert bei Laserleistung 60 % ab zwei Überfahrten immer größer ist als bei Laserleistung 100 %. Dieser Effekt könnte in Verbindung mit der Zunahme der Schädigungsdurchmesser bei erhöhen der Laserleistung stehen. Im Randbereich der Schädigungsdurchmesser findet eine Oberflächenumwandlung durch Aufschmelzen der Kristallstruktur statt, welche die Flanken dieser glättet und eine Verminderung des Ra-Wertes zur Folge hat.

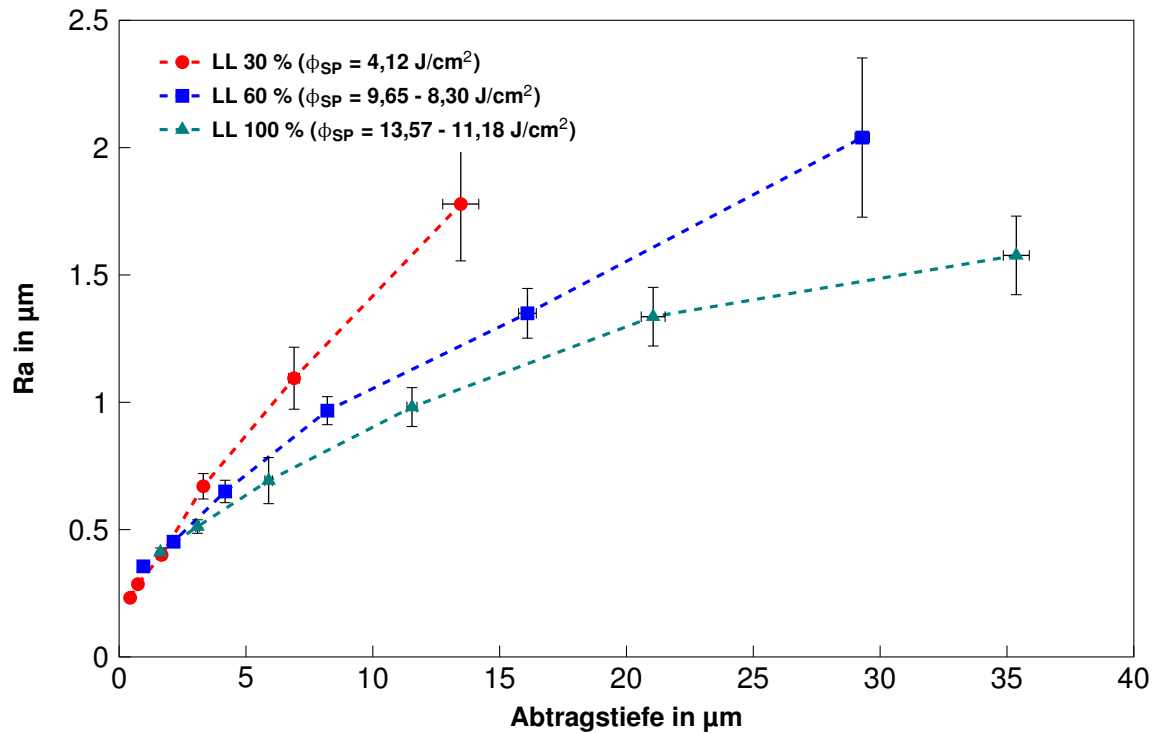


Bild 6.11: Kupfer Mehrfachüberfahrten: Spitzenfluenz über abgetragenes Volumen bei verschiedenen Spotabständen.

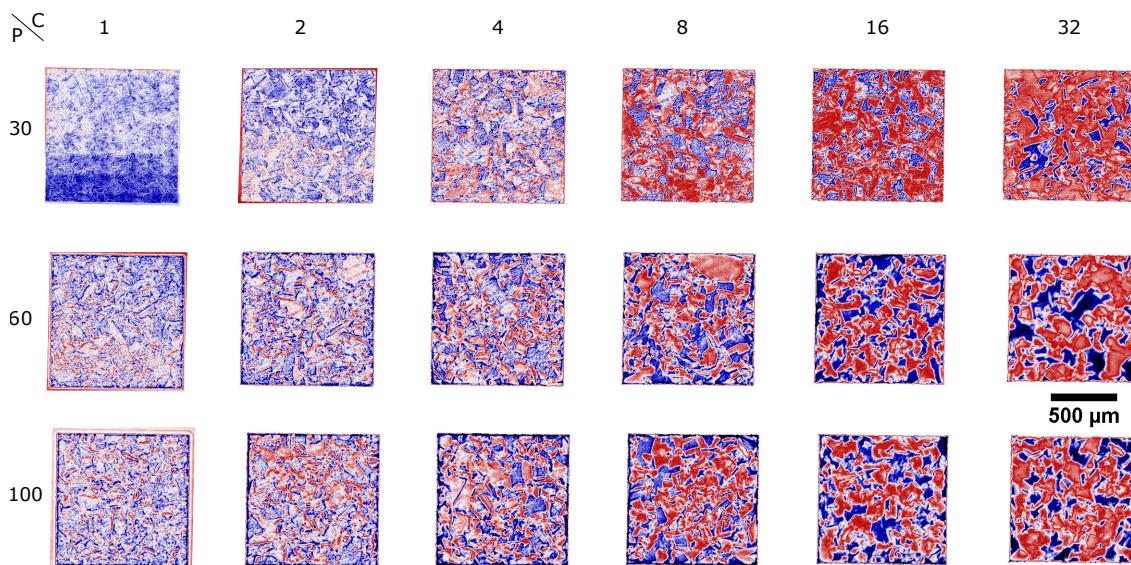


Bild 6.12: Profilometriaufnahmen der Mehrfachüberfahrten für Kupfer.

Bild 6.13 zeigt den Verlauf der Ra-Werte über der Abtragstiefe für Gold. Bei der Ablation mit Laserleistung 60 % ist innerhalb der Ablationsfelder 2 x, 4 x, 8 x und 16 x Überfahrten ein Effekt aufgetreten, der eine Differenzierung in einen oberen und unteren Bereich mit sich zieht. Die beiden Bereiche unterscheiden sich sowohl in ihrer Oberflächengüte als auch in ihrer Abtragstiefe.

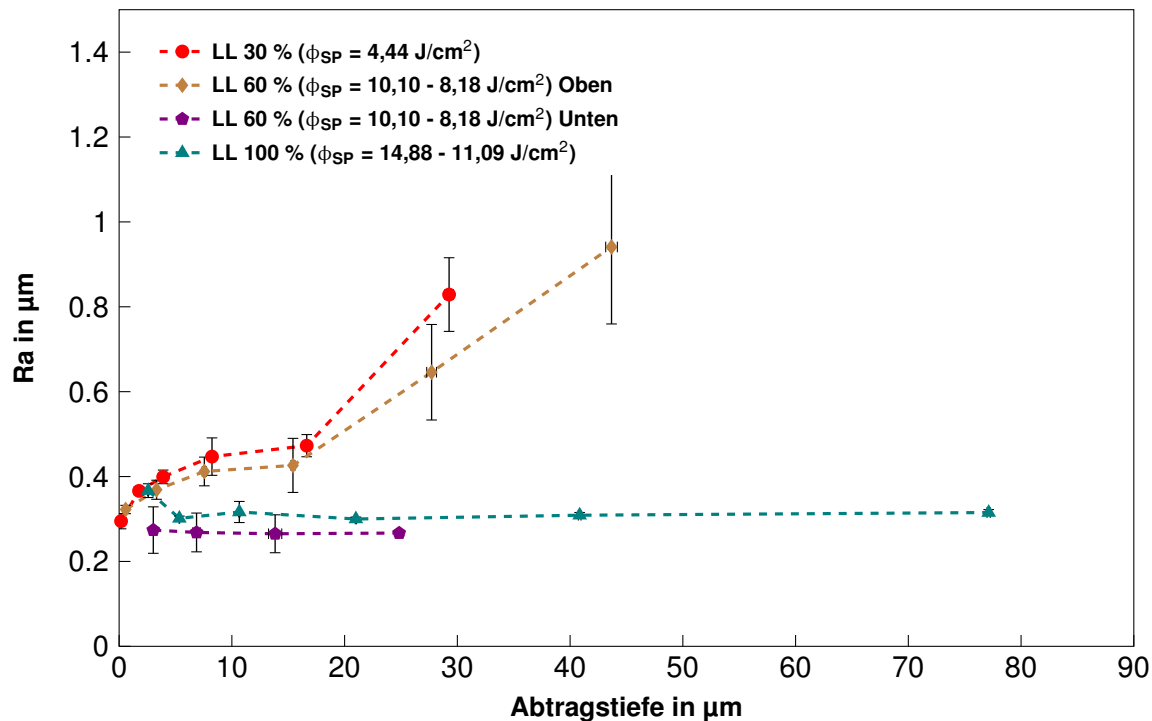


Bild 6.13: Gold Mehrfachüberfahrten: Spitzenfluenz über abgetragenes Volumen bei verschiedenen Spotabständen.

Der untere Bereich weist einen wesentlich niedrigeren und konstanteren Ra-Wert auf. Den Profilometrieaufnahmen (Bild 6.14) ist anzusehen, dass sich die Oberflächenstrukturen innerhalb dieser Ablationsfelder deutlich unterscheiden, obwohl sie bei den vermeintlich gleichen Prozessparametern ablatiert wurden.

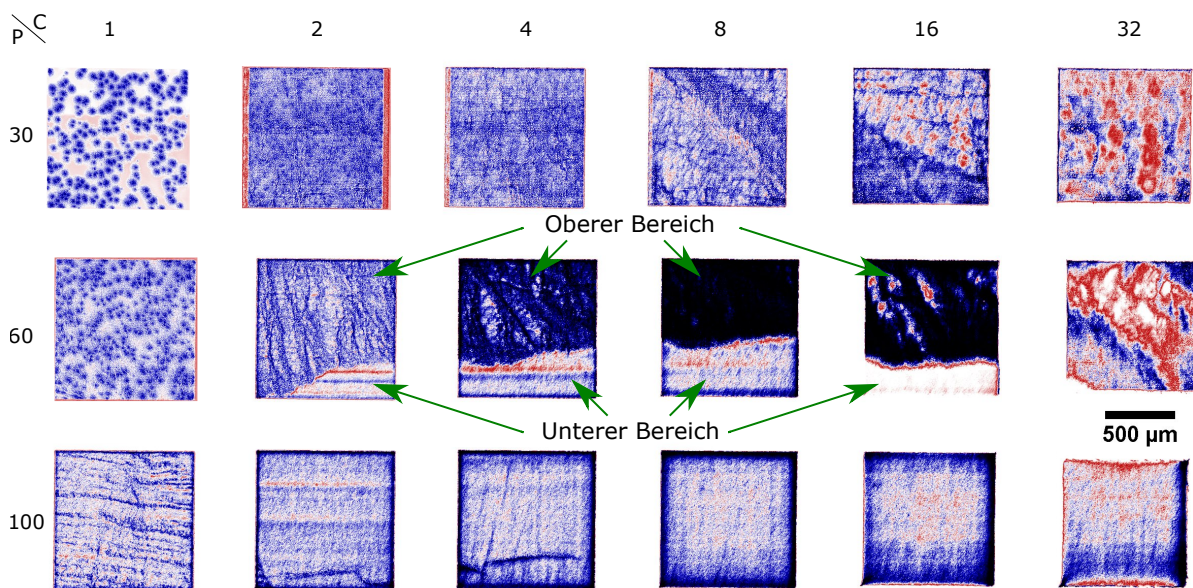


Bild 6.14: Profilometrieaufnahmen der Mehrfachüberfahrten für Gold: Unterscheidung in oberer und unterer Bereich bei Laserleistung 60 %.

Eine Vermutung diesen Effekt zu erklären, liegt in der Reihenfolge in denen die verschiedenen Laserleistungen ablatiert wurden. Nach der Laserleistung 30 % wurde eine Beschichtung des Schutzglases festgestellt, die eine Verminderung der ankommenden Leistung in der Vakuumkammer mit sich zieht. Um vergleichbare Spitzenfluenzen zu erreichen, wurde entschieden die Ablationsfelder bei Laserleistung 100 % als nächstes zu ablatieren. Aus der anschließenden Leistungsmessung konnte ein weiterer Anstieg der Beschichtung des Schutzglases mit verbundenem Leistungsverlust nachgewiesen werden. Für die nachfolgende Leistungsstufe (60 % Laserleistung) wurde ebenfalls eine Leistungsanpassung durchgeführt. Vermutlich wurden infolge des Ablationsprozesses bei 100% Laserleistung, die Werkstoff- bzw. Oberflächeneigenschaften im noch unablatierten Bereich der Laserleistung 60 % unwissentlich verändert. Die Folgen können sich in einem anderen Ablationsverhalten in diesen Bereichen widerspiegeln. Um eine fundierte Aussage treffen zu können, müssen in einer weiteren Messkampagne unter den selben Prozessbedingungen weitere Daten erhoben werden.

Im Vergleich der Oberflächenstrukturen bei einer Laserleistung von 30 % mit Laserleistung 100 % ist zu sehen, dass bei niedriger Laserleistung sich mit steigender Anzahl der Überfahrten eine gröbere Oberflächenstruktur ausbildet, die zu einer Erhöhung des Ra-Wertes führt. Ein gänzlich anderes Verhalten ist bei einer Laserleistung von 100 % festzustellen. Hier sind die Oberflächenstrukturen und Ra-Werte über den kompletten Ablationsbereich hinweg nahezu konstant. Diese Eigenschaften sind in Bezug auf die Laser-ablativen Mikroantriebe eine ideale Voraussetzung für einen Langzeitbetrieb. Tendenziell ist ein Sättigungseffekt auch bei den Materialien Kupfer und Aluminium unter bestimmten Prozessparametern festzustellen. Hierfür müssen aber in Folgeexperimenten die Prozessparameter dahingehend angepasst werden, so dass vergleichbare Abtragstiefen bei allen Materialien erreicht werden.

In Bezug auf die Oberflächenanalyse der Einfachüberfahrten in Kapitel 6.2 ist festzustellen, dass bei den Mehrfachüberfahrten kein fluenzunabhängiger Ra-Wert vorhanden ist. Lediglich bei kleinen Abtragstiefen ($\sim \leq 5 \mu\text{m}$) weisen die Ra-Werte eine Tendenz zur Fluenzunabhängigkeit auf. Dies ist wiederum eine sehr wichtige Erkenntnis um eine Abschätzung des Schubrauschens bei Langzeitbetrieb der Laser-ablativen Mikroantriebe machen zu können.

6.3.2 Volumen

Durch Annahme einer homogenen Verteilung der Beschichtung wurde die Abnahme der Spitzenfluenz mit dem Lambert-beerschen Gesetz entsprechend Formel 6.7 genähert. [20]

$$\phi(z_B) = \phi(0) \cdot e^{-\alpha \cdot z_B} \quad (6.7)$$

Dabei ist die Beschichtungsdicke z_B das Produkt aus der Ablationstiefe z_a und einen konstanten fluenz-abhängigen Faktor $F(\phi)$.

$$z_B = z_a \cdot F(\phi) \quad (6.8)$$

Durch Einsetzen erhalten wir:

$$\phi(z_B) \approx \phi(0) \cdot e^{-\alpha \cdot z_a \cdot F(\phi)} \quad (6.9)$$

Basis für die Berechnung des Absorptionskoeffizienten α nach Formel Alpha 6.10 sind die Leistungsmessungen die vor bzw. nach einer Leistungsstufen durchgeführt wurden. Die maximale Abtragstiefe z_{\max} ist dabei als die Summe aller Abtragstiefen der jeweiligen Leistungsstufe definiert (Abtragstiefe nach 63 Überfahrten). Es wird angenommen, dass die Beschichtungsdicke des Schutzglases über einen konstanten Faktor mit der integrierten Abtragstiefe gekoppelt ist. Des Weiteren wird vorausgesetzt, dass ein Ablationsfeld mit einer konstanten Fluenz und erst das darauffolgende Ablationsfeld mit einer verminderten Fluenz bearbeitet wird.

$$\alpha = \frac{1}{z_{\max}} \cdot \ln\left(\frac{\phi(0)}{\phi(z_{\max})}\right) \quad (6.10)$$

Bild 6.15 zeigt das abgetragene Volumen über der Anzahl der Überfahrten bei verschiedenen Laserleistungen und fixem Spotabstand von 12 μm für Aluminium. Der Volumenabtrag steigt bei allen Spitzenfluenzen und anzahl der Überfahrten linear an. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass kein Parameter wie z.B. der Ra-Wert oder ein Beschichtungseffekt Einfluss auf den Volumenabtrag hatte. Dies gewährleistet zudem eine konstante Volumenabtragsrate über den gesamten Bearbeitungsprozess hinweg.

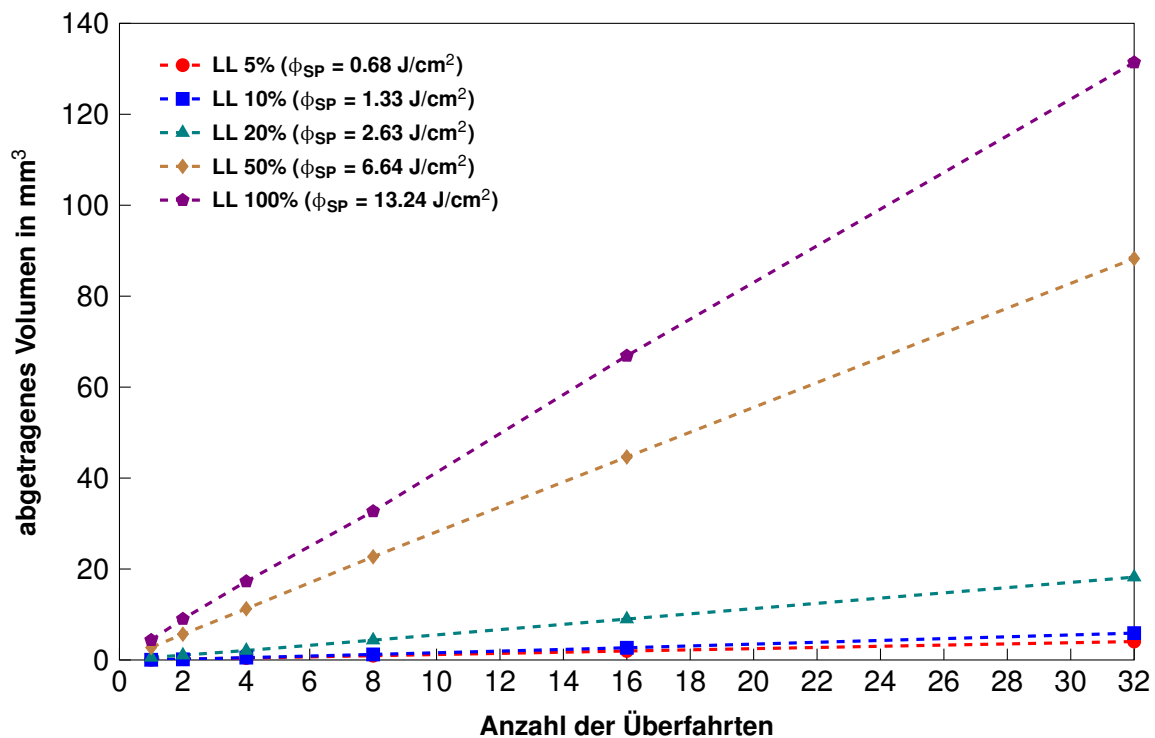


Bild 6.15: Aluminium Mehrfachüberfahrten: Spitzenfluenz über abgetragenes Volumen bei verschiedenen Spotabständen.

Die Bilder 6.16 und 6.17 zeigen den Verlauf des abgetragenen Volumens von Kupfer und Gold. Das „abknicken“ der Kurven belegt, dass während des Ablationsprozesses das Schutzglas beschichtet wurde. Zudem ist erkennbar, dass sich der Beschichtungseffekt erst ab acht Überfahrten deutlich auf den Verlauf der Kurven auswirkt. Als Referenz wurde aus den ersten vier Messpunkten eine lineare Regressionsgerade für jede Laserleistung erzeugt. Diese stellen den Idealverlauf des abgetragenen Volumens über die Anzahl der Überfahrten dar, für den Fall dass keine Beschichtung erfolgt. Die Regressionsgerade soll den tendenziellen Verlauf des abgetragenen Volumens darstellen. Für einen direkten Vergleich mit den Messpunkten fließen zu viele Störfaktoren in die Messwerte ein wie z.B. die fluenzabhängige Abtragstiefe. Um eine Aussage in Bezug auf das Beschichtungsverhalten treffen zu können wird stattdessen der Absorptionskoeffizient zu Rate gezogen. Dieser ist direkt an die Leistungsmessung der jeweiligen Laserleistung und der gemessenen Ablationstiefe aus der Profilometrieauswertung gekoppelt. Die Fehlerbetrachtung in Kapitel 6.2 und die Leistungsmessung aus Kapitel 5.1 zeigen, dass diese Messdaten eine geringe Fehlerbehaftung aufweisen und deshalb zu einer exakteren Abschätzung des Beschichtungseffekts beitragen.

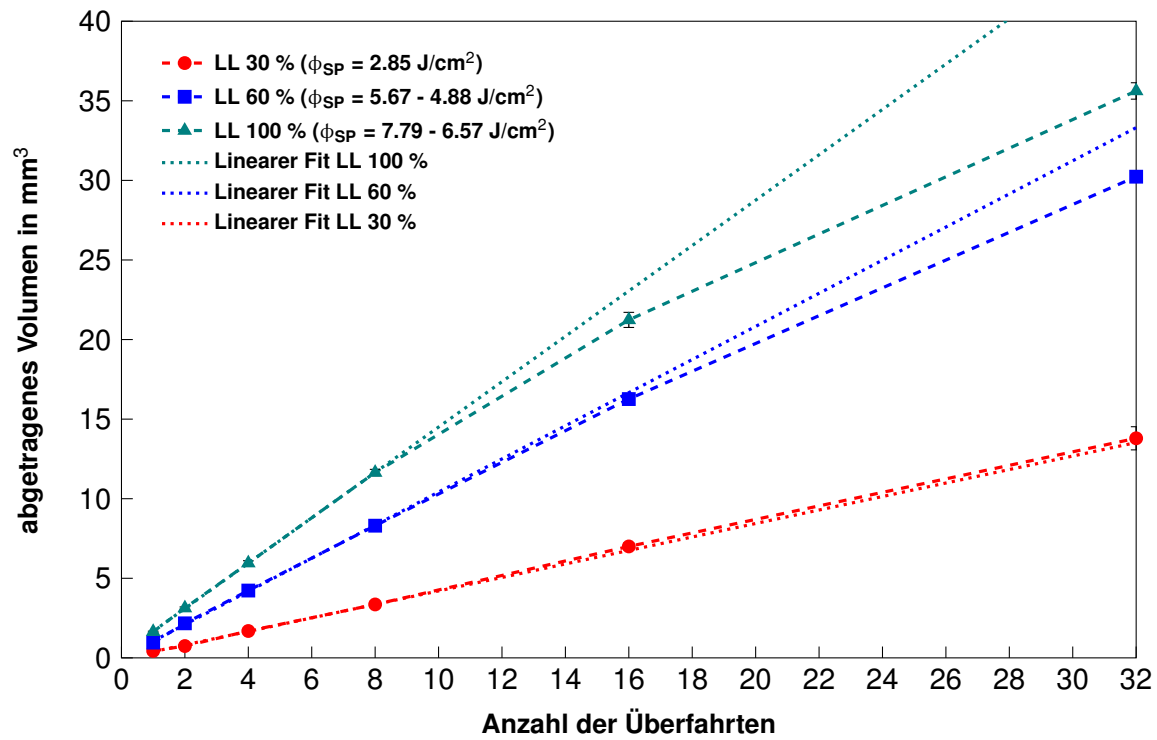


Bild 6.16: Kupfer Mehrfachüberfahrten: Spitzenfluenz über abgetragenenes Volumen bei verschiedenen Spotabständen.

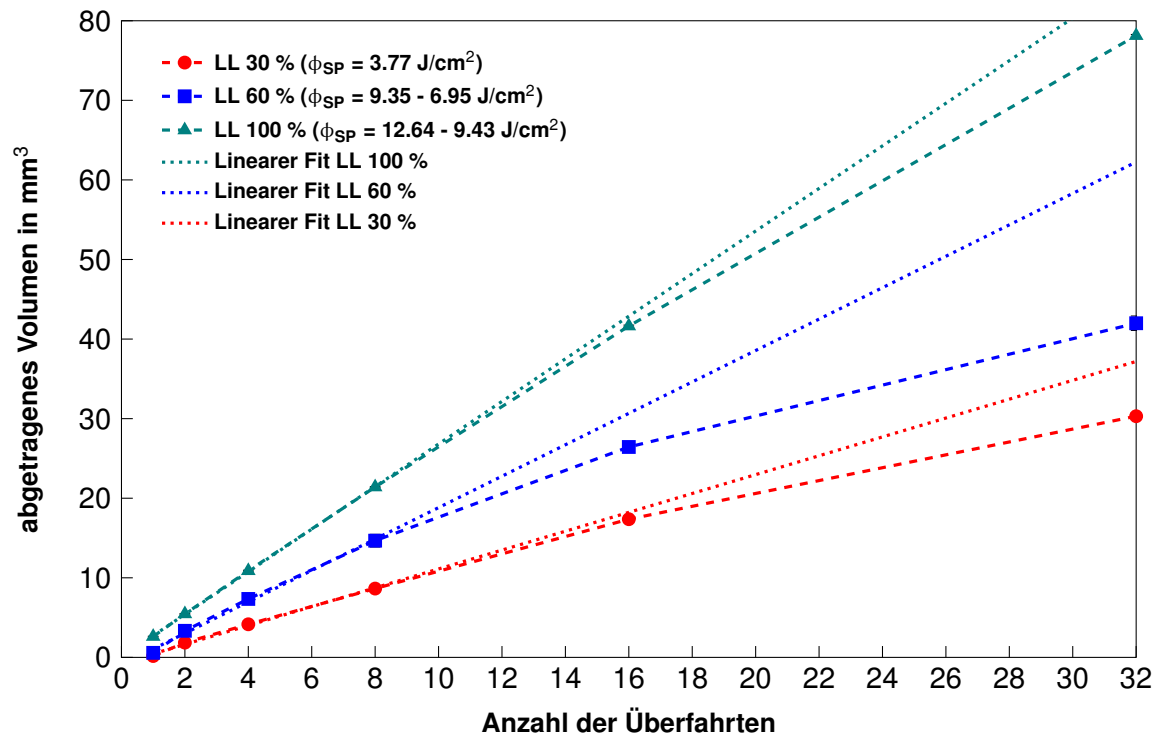


Bild 6.17: Gold Mehrfachüberfahrten: Spitzenfluenz über abgetragenenes Volumen bei verschiedenen Spotabständen.

Tabelle 6.18 zeigt die berechneten Absorptionskoeffizienten für die eingestellten Laserleistung der Materialien Gold und Kupfer. Dieser ist zu entnehmen, dass der Absorptionskoeffizient mit steigender Laserleistung abnimmt. Folglich wird weniger eingestrahlte Laserleistung an der Beschichtung des Schutzglases reflektiert. Dies erklärt die unterschiedlich stark „abknickenden“ Verläufe der Kurven bei steigenden Laserleistungen.

| | | Laserleistung | | |
|------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | 30% | 60% | 100% |
| α_g | $\frac{1}{\mu m}$ | $4,976 \cdot 10^{-3}$ | $3,217 \cdot 10^{-3}$ | $1,894 \cdot 10^{-3}$ |
| α_c | $\frac{1}{\mu m}$ | - | $5,760 \cdot 10^{-3}$ | $2,514 \cdot 10^{-3}$ |

Bild 6.18: Ermittelte Absorptionskoeffizienten für α_g für Gold und α_c für Kupfer bei 30 %, 60 %, 100 % Laserleistung.

Einen weiteren Erklärungsversuch liefern die Simulationsergebnissen aus [12]. Diese zeigen eine Erhöhung des spezifischen Impulses I_{sp} bei Ablation in Abhängigkeit der Fluenz und Pulslänge. Hieraus lässt sich die Vermutung ableiten, dass ablatiertes Material mit steigenden Fluenzen eine höhere Geschwindigkeit besitzt und in Folge dessen weniger ablatiertes Material am Schutzglas haften bleibt.

6.3.3 Normierung des Volumenabtrags in Bezug auf Einfachüberfahrten

Die folgenden Bilder 6.19, 6.20 und 6.21 zeigen das abgetragene Volumen pro Überfahrt der Mehrfachüberfahrten über der Spitzenfluenz. Referenzwerte stellen die Einfachüberfahrten bei 12 μm Spotabstand bei vergleichbarer Spitzenfluenz dar. Bei Aluminium deckt sich der Verlauf des abgetragenen Volumens pro Überfahrt mit den Referenzen der Einfachüberfahrten.

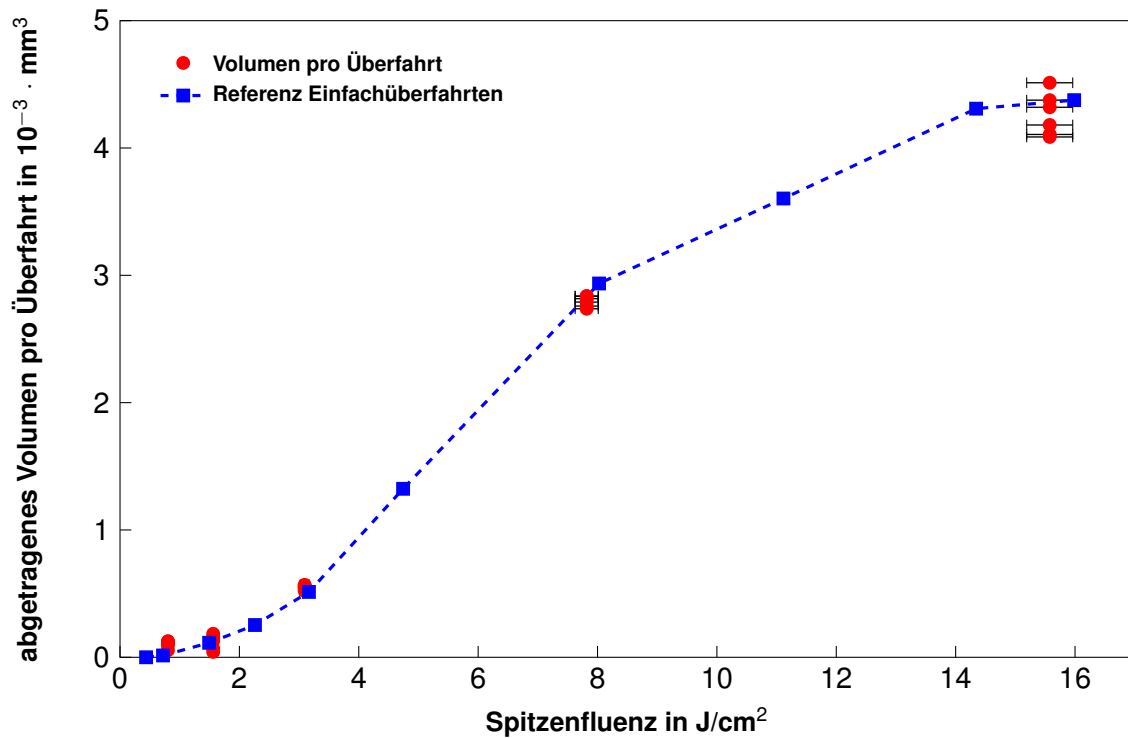


Bild 6.19: Aluminium Mehrfachüberfahrten: Abgetragenes Volumen pro Überfahrt über Spitzenfluenz, Referenzvolumenabtrag von Einfachüberfahrten mit Spotabstand 12 μm .

Betrachtet man Bild 6.20, welches den Materialabtrag für Gold zeigt, ist zu sehen, dass der Verlauf sich nur für höhere Spitzenfluenzen an die Referenz der Einfachüberfahrt annähert. Die beiden Bereiche unterscheiden sich sowohl in ihrer Abtragstiefe als auch in der Oberflächenbeschaffenheit (Betrachtung der Oberflächeneigenschaften in Kapitel 6.3.1). Für mittlere Spitzenfluenzen liegt das abgetragene Volumen unterhalb der Referenzkurve. Als eine mögliche Ursache der Abweichung kann die fehlende Differenzierung der beiden Bereiche bei der Volumenberechnung identifiziert werden.

Bei Betrachtung der beiden markierten Messpunkte in Bild 6.20 ergibt sich, trotz Bearbeitung mit identischen Parametern, eine deutliche Abweichung von der Referenzkurve. Belegt wird dies ebenfalls durch die dazugehörigen Profilometrieaufnahmen in Bild 6.14. Diesen ist zu entnehmen, dass sich bei einer Laserleistung von 30 % noch kein definiertes Ablationsfeld ausgebildet hat. Die Profilometrieaufnahmen bei Laserleistung 60 % deuten dagegen auf eine niedrigere Ablationstiefe hin. Als mögliche Ursachen für die Abweichungen der Messpunkte können ein veränderter Einfallswinkel oder eine geänderte Fokusslage infolge der Schutzglasbeschichtung genannt werden. Gegen diese Annahme spricht jedoch, dass alle anderen gemessenen Punkte keine vergleichbare Abweichung aufweisen.

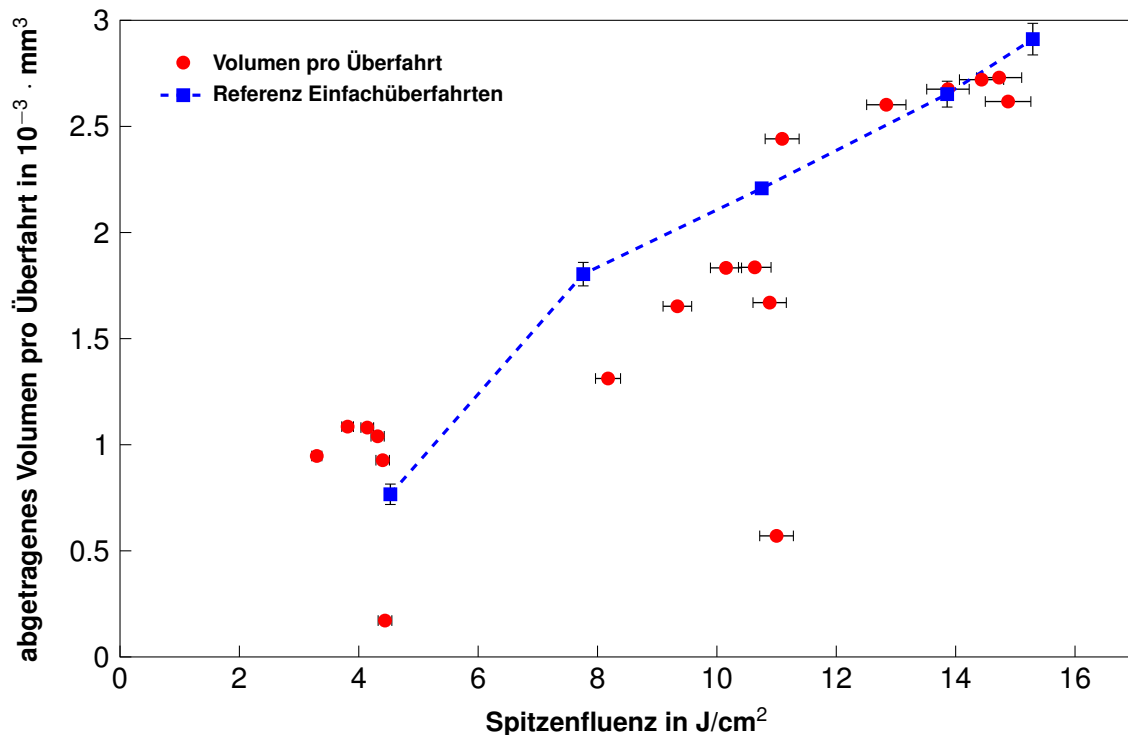


Bild 6.20: Gold Mehrfachüberfahrten: Abgetragenes Volumen pro Überfahrt über Spitzenfluenz, Referenzvolumenabtrag von Einfachüberfahrten mit Spotabstand $12 \mu\text{m}$.

Einen weiteren Erklärungsansatz für diese Abweichung bietet die Annahme, dass die Position des Ablationsfeldes auf der Probe das ablatierte Volumen beeinflusst. Bei genauerer Betrachtung liegen die beiden markierten Messpunkte im Randbereich der Probe bei der die Auslenkung des Laserstrahls durch die Galvanometerscannereinheit, respektive der Positionierungsfehler, am größten ist.

Gegen diese Vermutung spricht, dass alle Messpunkte der Mehrfachüberfahrten bei 100 % Laserleistung nahe der Referenzkurve liegen und die Messpunkte der Mehrfachüberfahrten von Kupfer (Bild 6.21) sich größtenteils über der Referenzkurve befinden. Zudem sind die Außenmaße der Goldprobe pro Seite um $2,5 \text{ mm}$ pro Seite kleiner als die der Kupfer- und Aluminiumprobe. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass vermutlich die Schutzglasbeschichtung zu einer unwillkürlichen Parametervariation führt, welche Auswirkung auf das abgetragene Volumen der Mehrfachüberfahrten bei Gold und Kupfer hat. Diese Aussage wird vom Ablationsverhalten der Aluminiumprobe, bei der das Schutzglas keine Beschichtung aufweist, gestützt.

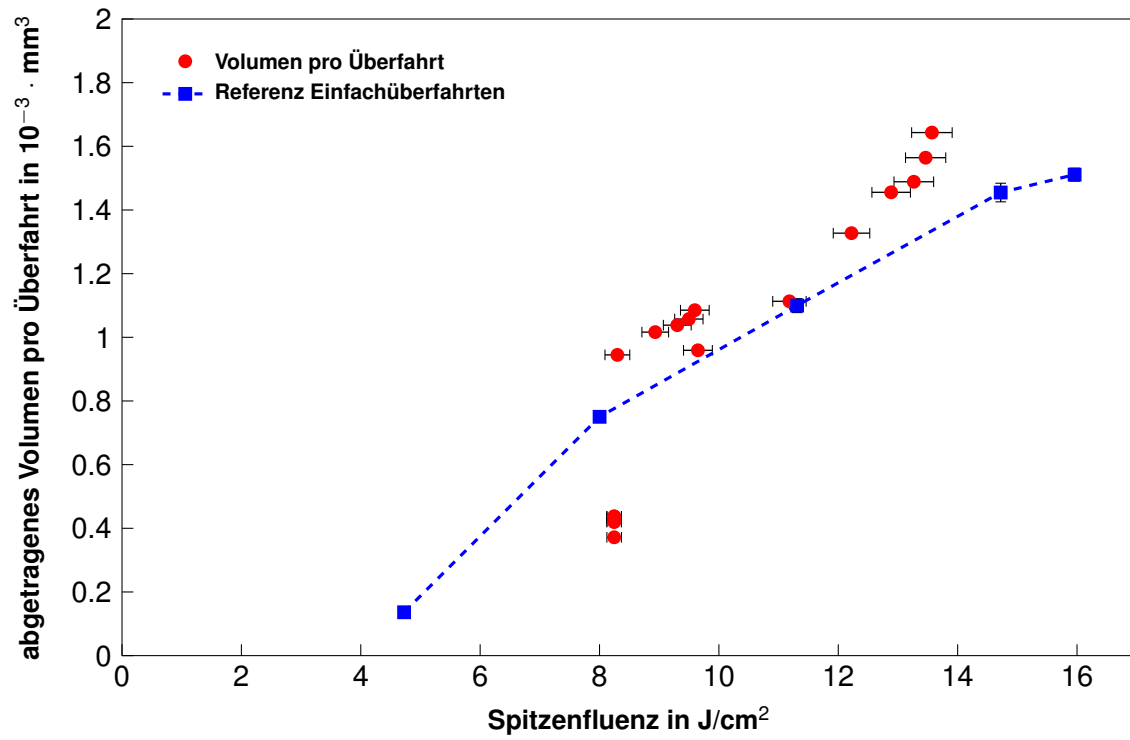


Bild 6.21: Kupfer Mehrfachüberfahrten: Abgetragenes Volumen pro Überfahrt über Spitzenfluenz, Referenzvolumenabtrag von Einfachüberfahrten mit Spotabstand 12 μm .

6.4 Diskussion Mikroantriebe

Bild 6.22 vergleicht den Ra-Wert über der Abtragstiefe für die untersuchten Materialien bei einer Laserleistung von 100 %. Die Materialien Kupfer und Aluminium zeigen eine Erhöhung des Ra-Wertes mit steigender Abtragstiefe. Gold weist einen nahezu konstanten Ra-Wert über der Abtragstiefe von 80 μm auf. In Bezug auf den Einfluss der Oberflächengüte auf das Schubrauschen, sollte sich ein niedriger sowie konstanter Ra-Wert am geringsten auf das Schubrauschen auswirken. Es wird zudem garantiert, dass der Einfallswinkel des Laserstrahls über den Zeitraum der Schuberzeugung nicht verändert wird. Sollte sich wie bei den Materialien Kupfer und Aluminium die Oberflächenstruktur mit steigender Abtragstiefe ändern, so resultiert daraus eine Veränderung des Schubvektors, was ein unvorhersehbares Verhalten bei der Schuberzeugung mit sich zieht.

In diesem Zusammenhang wäre es interessant, vergleichbare Abtragstiefen mit einem Ultrakurzpuls-Lasersystem zu erzeugen, da diese das Potenzial aufweisen, noch geringere Ra-Werte beim Ablationsprozess erzielen zu können [18].

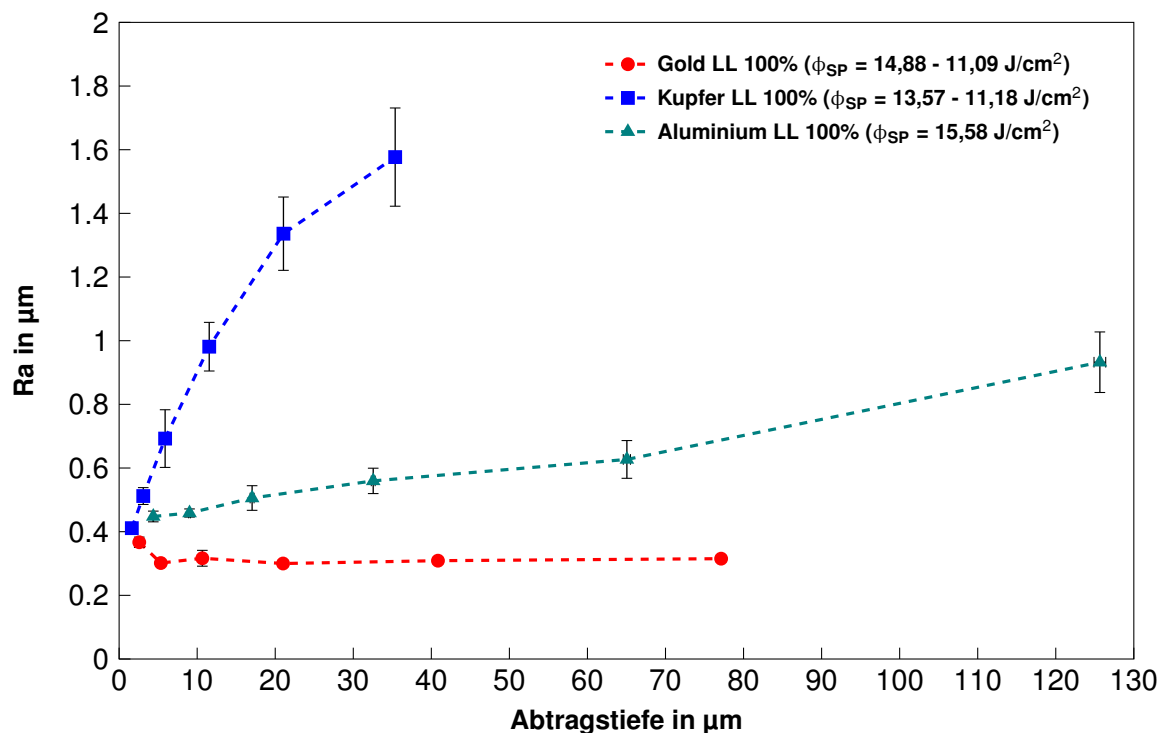


Bild 6.22: Vergleich der bei Mehrfachüberfahrten (1x - 32x) von Gold, Aluminium, Kupfer ermittelten Ra-Werte über der Abtragstiefe bei maximalen Spitzenfluenszen.

Im Vergleich zu den vorangegangenen Experimenten[11], bei denen ein Sättigungsverhalten bei Kupfer vermutet wurde, konnte dies bis zu einer Abtragstiefe von 40 μm nicht bestätigt werden. Jedoch muss bedacht werden, dass die vorangegangenen Experimente mit einem 10 ps Lasersystem durchgeführt und eine maximale Abtragstiefe von maximal 12 μm erreicht wurde. Eine weitere Messkampagne bei der mit einem 10 ps Lasersystem unter gleichen Bearbeitungsbedingungen die Ablationsfelder abgetragen werden sollte letztendlich Gewissheit über ein Sättigungsverhalten für die gewählten Materialien liefern. Die Auswertung der erzeugten Messdaten kann hierbei mit den in Kapitel 4 beschriebenen Makrobefehlen erfolgen.

6.4.1 Energiespezifisches Volumen

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, eignet sich das energiespezifische Volumen um, eine Abschätzung des Prozesswirkungsgrades machen zu können. In Bild 6.23 ist das energiespezifische Volumen über der Spitzenfluenz für Aluminium bei Mehrfachüberfahrten aufgetragen. Dabei sind die Messpunkte mit gleicher Anzahl an Überfahrten miteinander verbunden. Eine nichtlineare Anpassung mittels Gleichung 2.8 war in diesem Fall auch nicht möglich (vgl. Kapitel 6.2.2).

Für kleine Spitzenfluenzen $\geq 2 \text{ J/cm}^2$ ist ein auffallender „Knick“, der mit steigender Anzahl der Überfahrten abnimmt, zu sehen. Der höchste Prozesswirkungsgrad kann im Bereich $\sim 8 \text{ J/cm}^2$ angenommen werden. Dieses Ergebnis deckt sich mit dem der Einfachüberfahrten in 6.2.2. Daraus ist abzuleiten, dass der Prozesswirkungsgrad die Tendenz zeigt, unabhängig von der Anzahl der Überfahrten zu sein. In Bezug auf einen Langzeitbetrieb des Mikroantriebes wäre das eine ideale Eigenschaft um konstante Bearbeitungsparameter gewähren zu können.

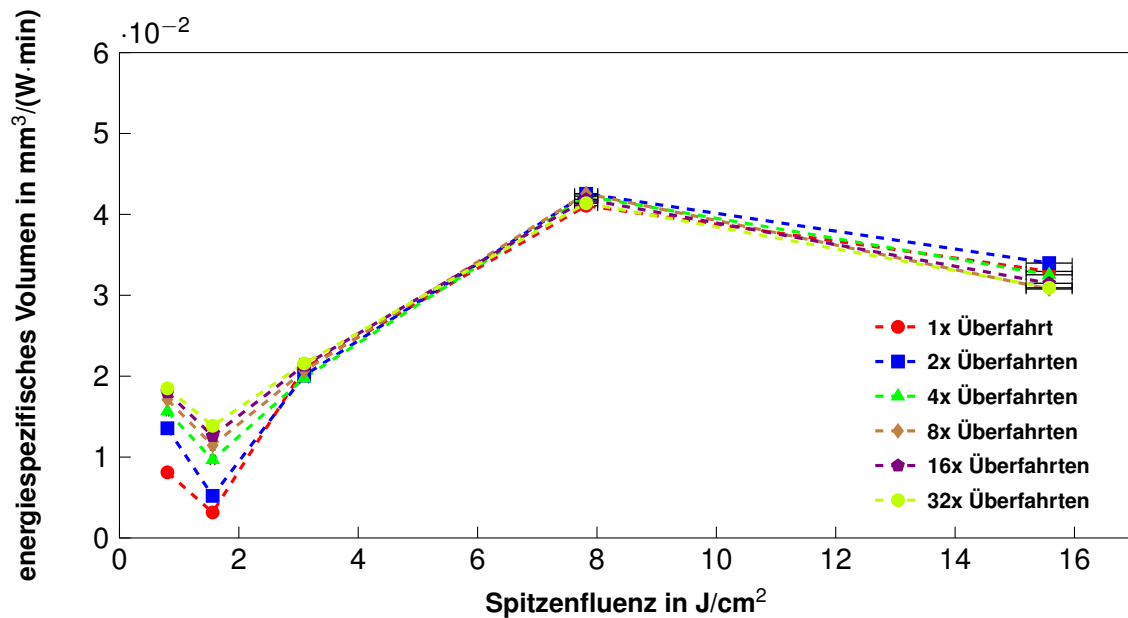


Bild 6.23: Energiespezifisches Volumen über Fluenz für Aluminium bei Mehrfachüberfahrten.

Eine Problematik bei der Quantifizierung des energiespezifischen Volumens in Bezug auf die Laser-Mikroantriebe ist die Abhängigkeit von der Dichte. Da ein Schub ausschließlich aus der abgetragenen Masse erzeugt wird, zeigen poröse Materialien zwar ein hohes energiespezifisches Volumen, aber es kann keine klare Aussage über den erzeugten Schub gemacht werden. Ein möglicher Vorschlag wäre eine energiespezifische Masse nach Gleichung 6.11 zu definieren. Der Vorteil hierbei wäre, dass alle materialspezifischen Eigenschaften in m_E vereint sind und die Abhängigkeit zu den Laser-ablativen Eigenschaften besser differenziert werden könnte. Dies würde eine bessere Vergleichbarkeit verschiedener Materialien bei konstanten Laserparametern ermöglichen.

$$m_E = V_E \cdot \rho = \frac{c_m}{g \cdot I_{Sp}} = \frac{c_m}{\langle v \rangle} \quad (6.11)$$

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit wurde das Ablationsverhalten von Aluminium, Kupfer und Gold bei Bearbeitung mit einem 500 ps Lasersystem untersucht. Grundlage der Versuchsdurchführung war die Verbesserung eines vorhandenen Versuchsaufbaus mit Anpassung an neue Bearbeitungsbedingungen.

Die Problematik der Schauglasbeschichtung bei Mehrfachüberfahrten wurde durch einbringen eines Schutzglases, sowie der Blende in der Vakuumkammer gelöst. Jedoch besteht weiterhin Handlungsbedarf um den Einfluss des beschichteten Schutzglases auf den Ablationsprozess zu verhindern. Wie in der Auswertung der Experimente dargelegt, hat die Beschichtung einen dauerhaften negativen Einfluss auf die Messergebnisse. Eine mögliche Lösung ist, ein ausreichend großes Schutzglas auf eine automatisch verfahrbare Linearachse innerhalb der Vakuumkammer zu installieren. Mit dieser ist es möglich, ohne Abpumpen des Vakuums, von außen das Schutzglas zu verfahren, so dass immer ein nicht beschichteter Teil genutzt wird. Diese Maßnahmen sollte der Abweichung der Messergebnisse für Gold und Kupfer entgegen wirken. Dennoch können auch wichtige Information bei der Untersuchung der beschichteten Schutzgläser gewonnen werden, die zu einer anderen Lösung der Problematik beitragen können.

Bei Ermittlung der Ablationsschwelle lies sich zeigen, dass eine Differenzierung der Schädigungsdurchmesser zu zwei unterschiedlichen Ablationsschwellen führte. So kann eine der Ablationsschwellen als Indikator zur Umwandlung der Oberflächenstruktur und eine weitere Ablationsschwelle als Indikator für den Materialabtrag angesehen werden. Transferiert man diese Erkenntnis auf die Laser-ablativen Mikroantrieben, erfährt die Schwelle des Materialabtrags eine größere Bedeutung als die der Oberflächenumwandlung. Ein Verwendungsansatz der Ablationsschwelle für Oberflächenumwandlung könnte die Vorbehandlung der Materialoberfläche („anrauen“) oder auch das Glätten vorhandener Strukturen eines Ablationsfeldes sein um das Absorptionsverhalten positiv zu beeinflussen.

Kern der Untersuchungen war das Ablationsverhalten der Materialien bei Mehrfachüberfahrten. Hierzu wurde die Oberflächenbeschaffenheit sowie das abgetragene Volumen analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass Gold bei vergleichbaren Spitzenfluenzen über einer Abtragstiefe von 80 μm einen nahezu konstanten Ra-Wert aufweist. Eine weitere Erkenntnis ist, dass es keinen Zusammenhang zwischen dem fluenzunabhängigen Verhaltens des Ra-Wertes von Aluminium bei Einfachüberfahrten und dem Ra-Wert mit steigenden Abtragstiefen bei Mehrfachüberfahrten gibt. In einer weiteren Messkampagne sind für die Materialien Kupfer und Gold die Mehrfachüberfahrten bei einem Spotabstand von 20 μm ein interessanter Ansatzpunkt um das fluenzunabhängige Verhalten näher zu untersuchen.

Die Erkenntnisse der Mehrfachüberfahrten sind für Laser-ablative Mikroantriebe von Bedeutung, da sich nur auf diese Weise Aussagen über das der Oberflächenstruktur induzierte Schubrauschen treffen lassen. In diesem Zusammenhang weist Gold das größte Potenzial auf, ein möglichst geringes Schubrauschen zu erzeugen. Um genauer abschätzen zu können aus welchen Oberflächenstrukturgrößen der Ra-Wert sich zusammensetzt, kann mit Hilfe der FFT Analyse jeder Strukturgröße ein Teil des Frequenzspektrums zugeordnet werden.

Um die erarbeiteten Thesen auch in Folgeexperimenten bestätigen zu können, wurde eine automatische

Datenauswertung in Form von Markobefehlen erstellt. Durch Anwendung dieser Form der Datenauswertung konnte die Effizienz des Auswertungsprozesses gesteigert und eine standardisierte Auswertungsmethode für weitere Messkampagnen geschaffen werden.

Im Zuge der Versuchsdurchführung wurden auch die Materialien Stahl und Graphit bearbeitet. Deren Auswertung erweitert die Bandbreite der untersuchten Materialien und liefert weitere Informationen über das Laser induzierte Ablationsverhalten.

Bei der Planung der Folgeexperimente wurde bereits festgelegt, dass die Laserquelle des Versuchsaufbaus gegen ein 5 ns Lasersystem getauscht und eine weitere Messkampagne mit ausgewählten Materialien durchgeführt wird. Mit den daraus gewonnen Daten kann das Ablationsverhalten für verschiedene Pulsregime (10 ps [11], 500 ps und 5 ns) und die Korellation des Schubrauschen in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit untereinander verglichen werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] John K Ziemer and Stephen M Merkowitz. *Microthrust propulsion of the LISA mission*. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2004.
- [2] Arthur Kantrowitz. Propulsion to orbit by ground based lasers. *Aeronaut. Astronaut.*, 10:74–76, 1972.
- [3] Claude Phipps and James Luke. Diode laser-driven microthrusters: a new departure for micropropulsion. *AIAA journal*, 40(2):310–318, 2002.
- [4] Hans-Albert Eckel, Stefan Scharring, Stephanie Karg, Christian Illg, and Johannes MF Peter. Overview of laser ablation micropropulsion research activities at dlr stuttgart. In *Conference Proceedings-Teilnehmer-CD*, 2014.
- [5] B Neuenschwander, B Jaeggi, and M Schmid. From fs to sub-ns: Dependence of the material removal rate on the pulse duration for metals. *Physics Procedia*, 41:794–801, 2013.
- [6] Thomas Graf Helmut Hügel. *Laser in der Fertigung. Grundlagen der Strahlquellen, Systeme, FertigungsFertigung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, Auflage3, 2014.
- [7] Beat Neuenschwander, Guido F Bucher, Christian Nussbaum, Benjamin Joss, Martin Muralt, Urs W Hunziker, and Peter Schuetz. Processing of metals and dielectric materials with ps-laserpulses: results, strategies, limitations and needs. In *SPIE LASE*, pages 75840R–75840R. International Society for Optics and Photonics, 2010.
- [8] Vasily N Lednev, Sergey M Pershin, Elena D Obraztsova, Sergey I Kudryashov, and Alexey F Bunkin. Single-shot and single-spot measurement of laser ablation threshold for carbon nanotubes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(5):052002, 2013.
- [9] A Feuer, C Kunz, M Kraus, V Onuseit, R Weber, T Graf, D Ingildeev, and F Hermanutz. Influence of laser parameters on quality of microholes and process efficiency. In *SPIE LASE*, pages 89670H–89670H. International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [10] E Yu Loktionov, Yu S Protasov, and Yu Yu Protasov. Experimental investigation of recoil-momentum-generation efficiency under near-ir femtosecond laser ablation of refractory metals in vacuum. *Optics and Spectroscopy*, 115(5):758–763, 2013.
- [11] Pastuschka L. Optimierung des materialabtrags für laser-ablative mikroantriebe. Master’s thesis, Universität Stuttgart, 2015.
- [12] S. Scharring; R.-A. Lorbeer; H.-A. Eckel. Numerical simulations on laser-ablative micropropulsion with short and ultrashort laser pulses. *Eingereicht*, 2015.
- [13] SCANLAB AG: *Installation und Inbetriebnahme intelliSCANse Â®14. Rev. 2.6 d; Scanlab AG, Dokumentation. Puchheim, 2014.*
- [14] Johannes Schindelin, Ignacio Arganda-Carreras, Erwin Frise, Verena Kaynig, Mark Longair, Tobias

- Pietzsch, Stephan Preibisch, Curtis Rueden, Stephan Saalfeld, Benjamin Schmid, et al. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature methods*, 9(7):676–682, 2012.
- [15] Caroline A Schneider, Wayne S Rasband, Kevin W Eliceiri, et al. Nih image to imagej: 25 years of image analysis. *Nat methods*, 9(7):671–675, 2012.
- [16] Johnssen-P.O. Dougherty R-Lunden-Berli E. Chinga, G. and J. Walter. Quantification of the 3-d micro-structure of sc surfaces. *J. Microscopy* 227(3): 254-265, 2007.
- [17] *Teem Photonics, Certificate of Compliance, Reference 21065382 , Rev. 000, 29.11.2010.*
- [18] Stefan Scharring, Raoul-Amadeus Lorbeer, Stephanie Karg, Lisa Pastuschka, Hans-Albert Eckel, and Daniel Johannes Förster. The microlas concept-precise thrust generation in the μn range by laser ablation. In *Conference-DVD*, 2015.
- [19] JM Liu. Simple technique for measurements of pulsed gaussian-beam spot sizes. *Optics letters*, 7(5):196–198, 1982.
- [20] Gerd Wedler. *Lehrbuch der Physikalischen Chemie*. Verlag Chemie, Weinheim u. a., 1982.

Anhang A: Fertigungszeichnungen

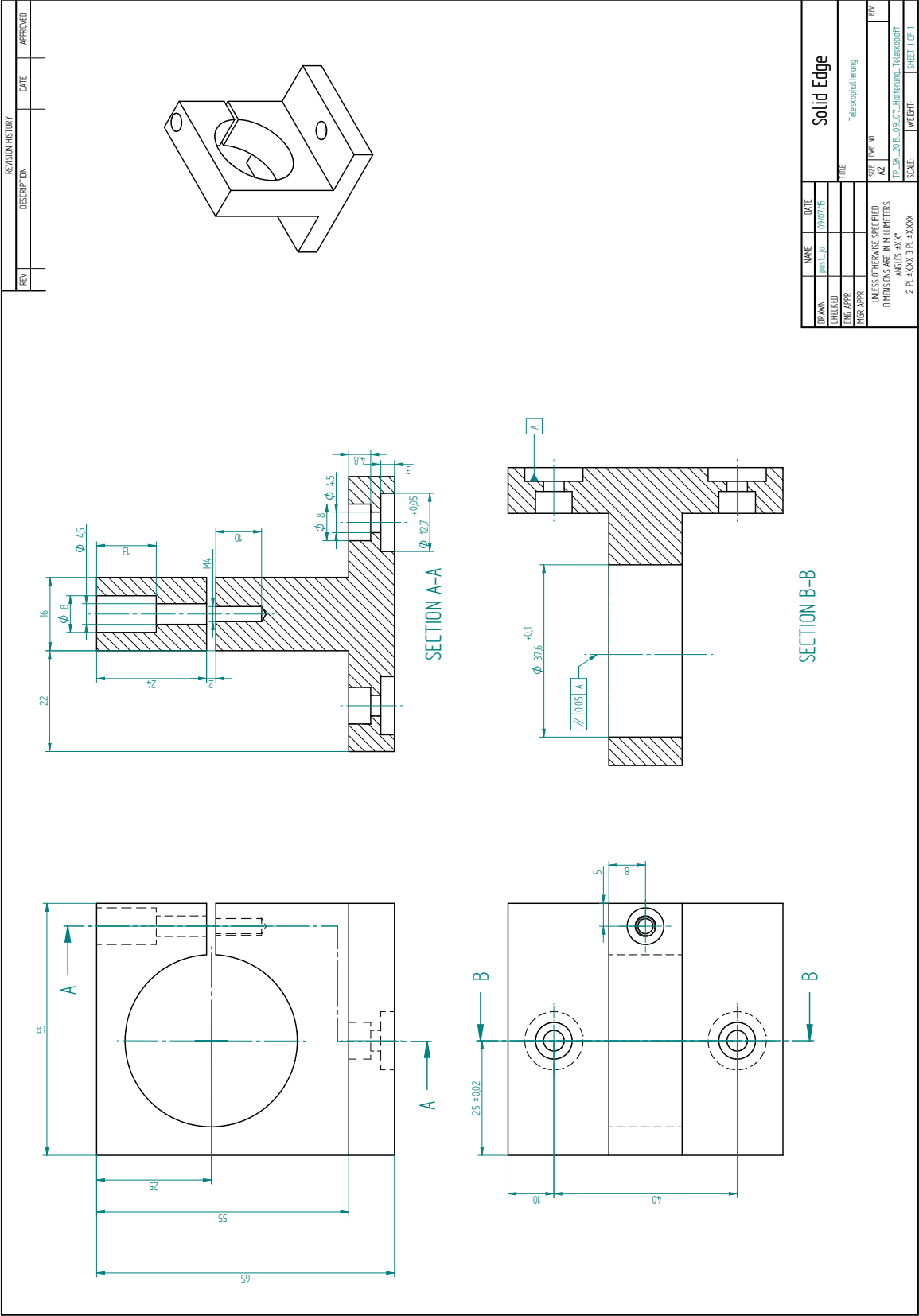


Bild 8.1: Fertigungszeichnung Teleskophalterung.

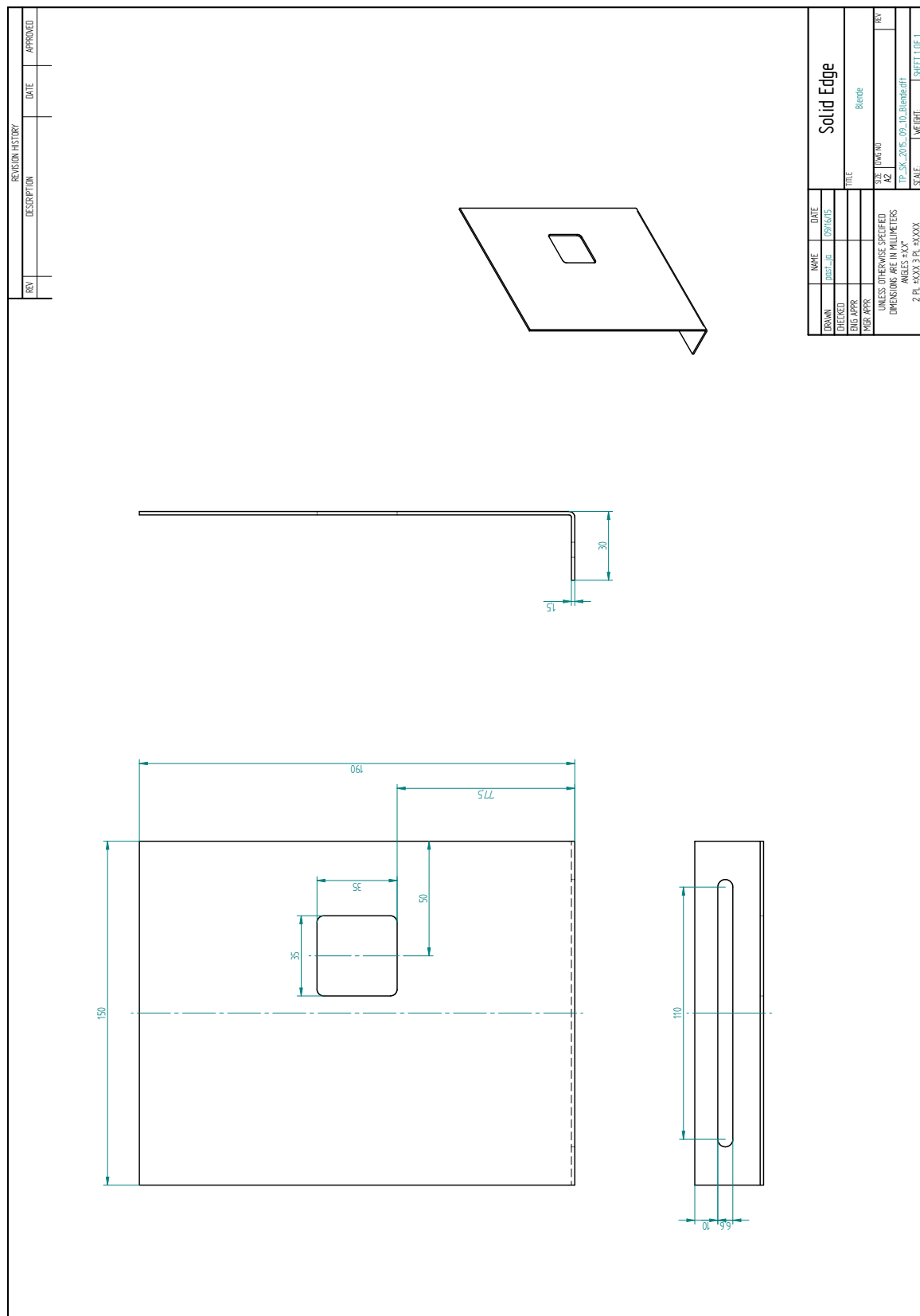


Bild 8.2: Fertigungszeichnung Blende.

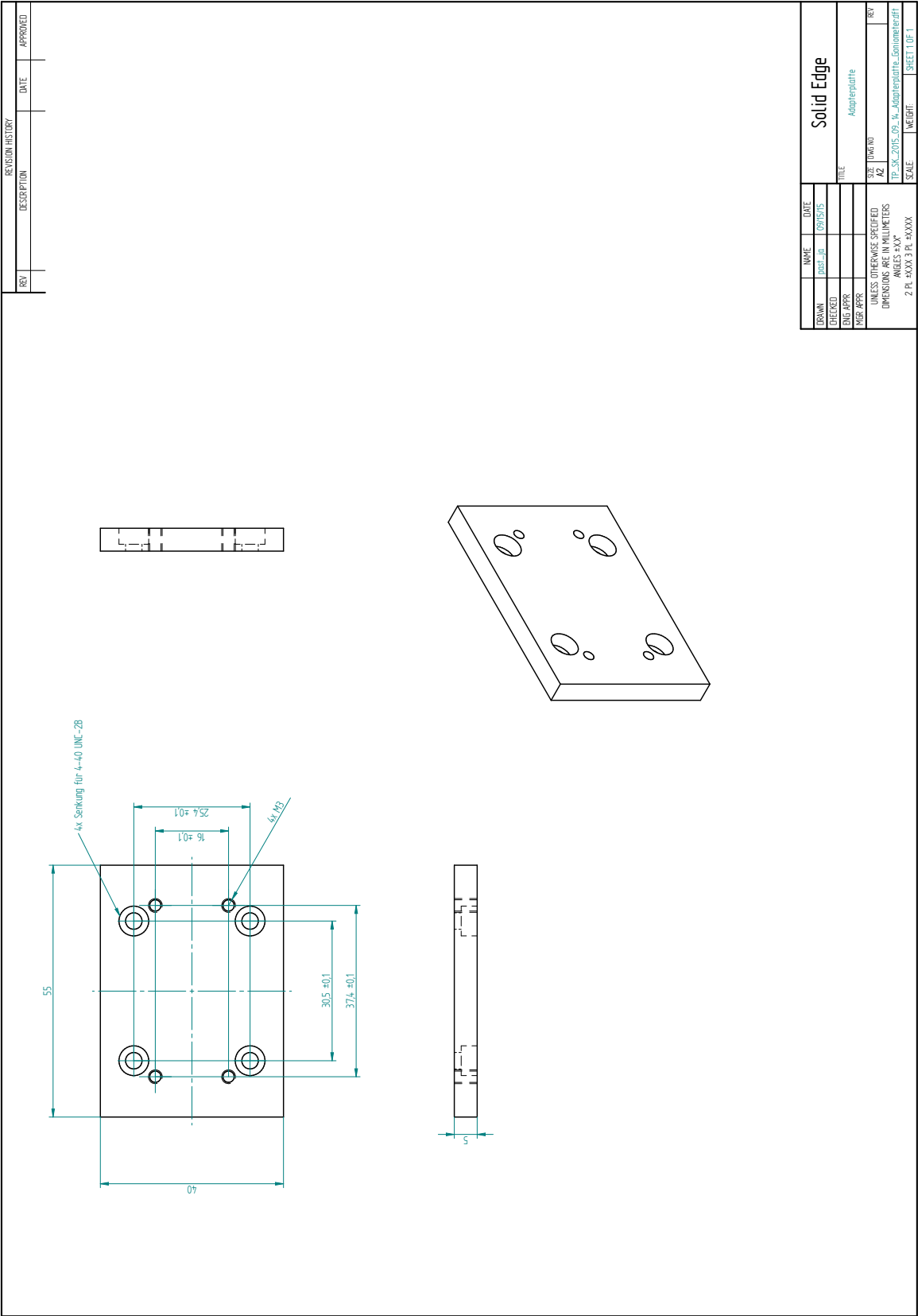


Bild 8.3: Fertigungszeichnung Adapterplatte.

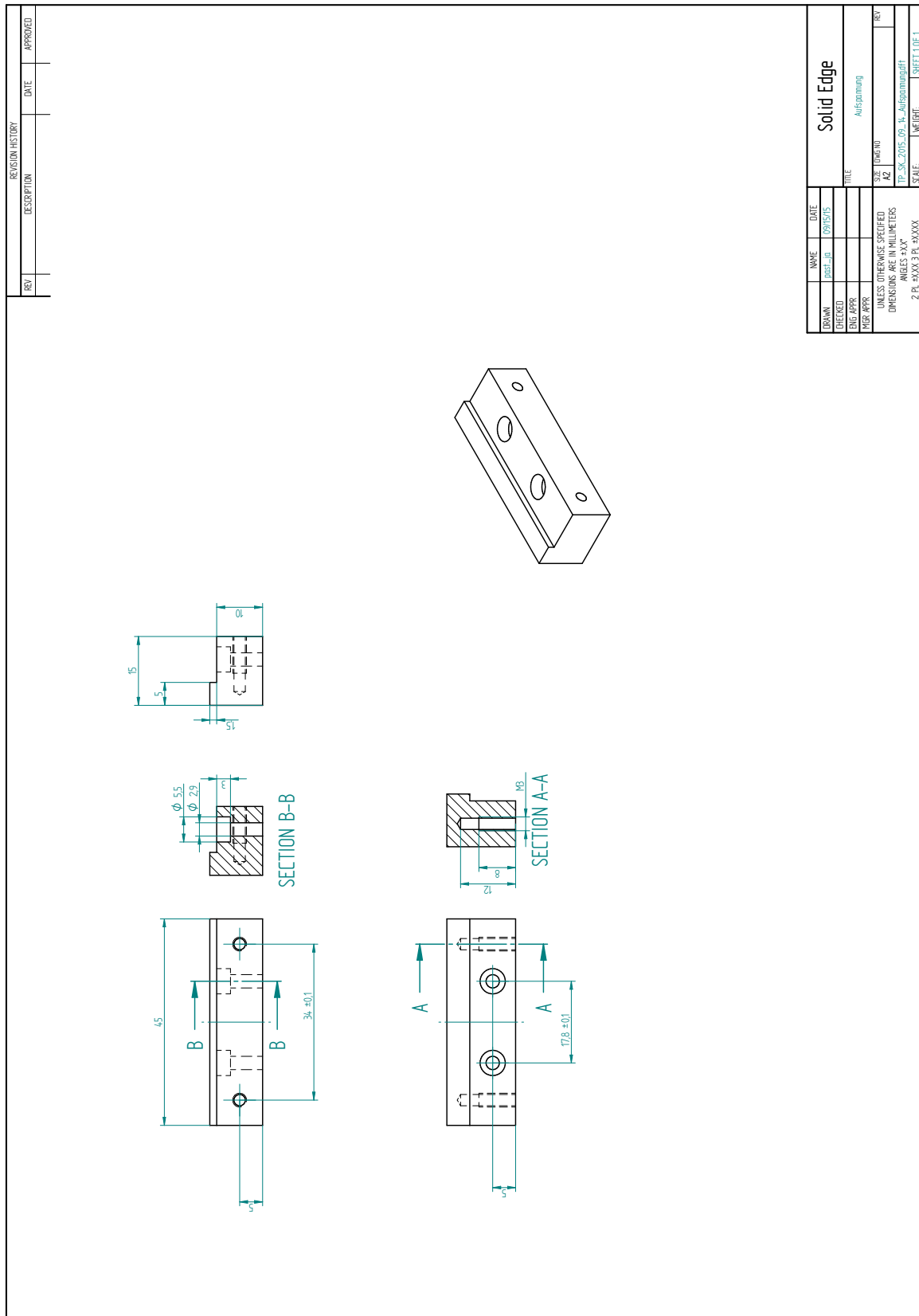


Bild 8.4: Fertigungszeichnung Aufspannung.

Anhang B: Volumen Einfachüberfahrten

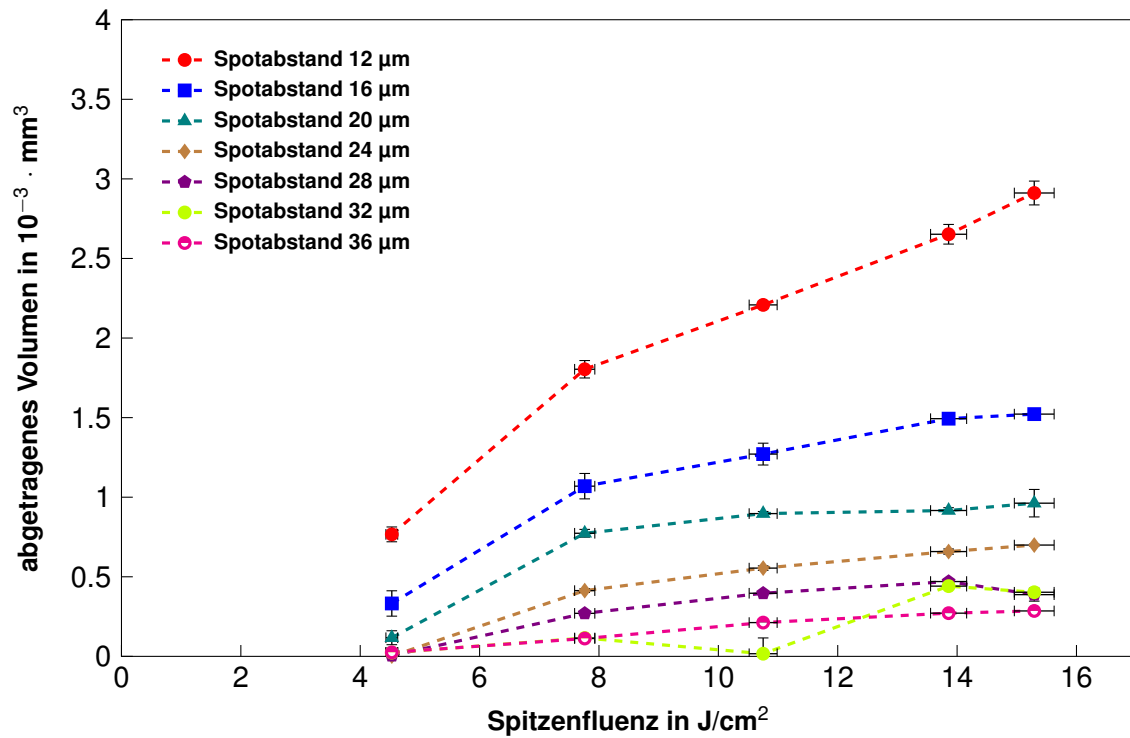


Bild 8.5: Gold Einfachüberfahrten: Spitzenfluenz über abgetragen Volumen bei verschiedenen Spotabständen.

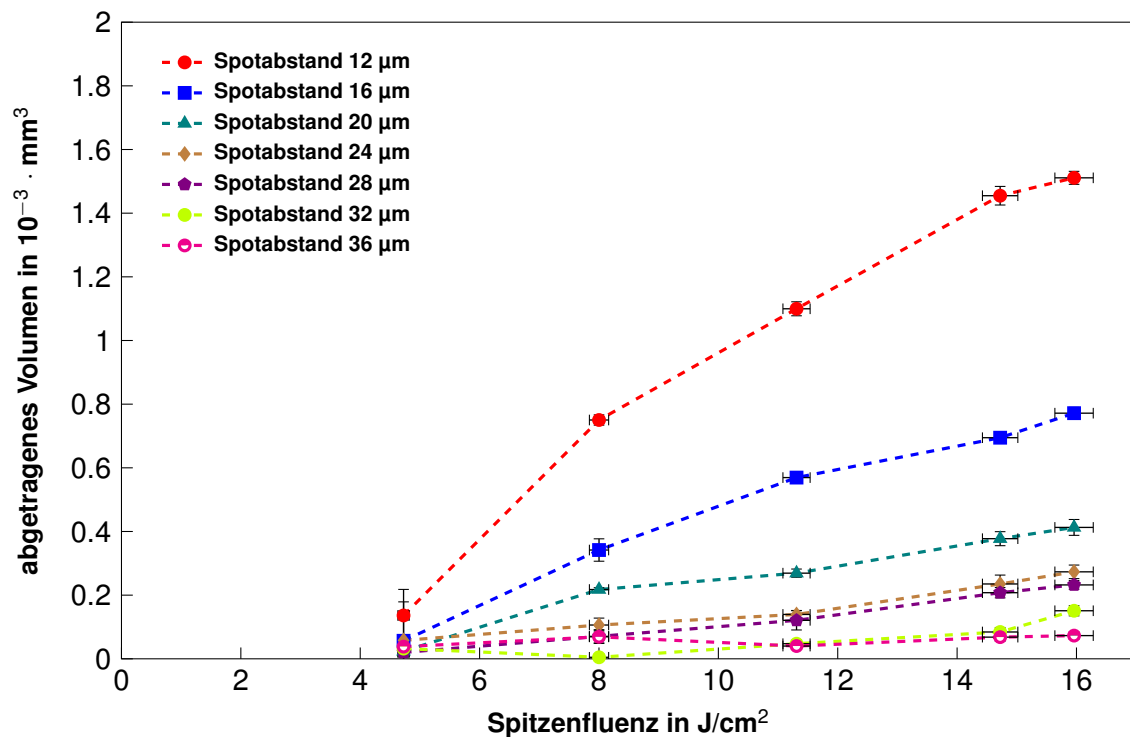


Bild 8.6: Kupfer Einfachüberfahrten: Spitzenfluenz über abgetragen Volumen bei verschiedenen Spotabständen.

Anhang C: Energiespezifisches Volumen Einfachüberfahrten

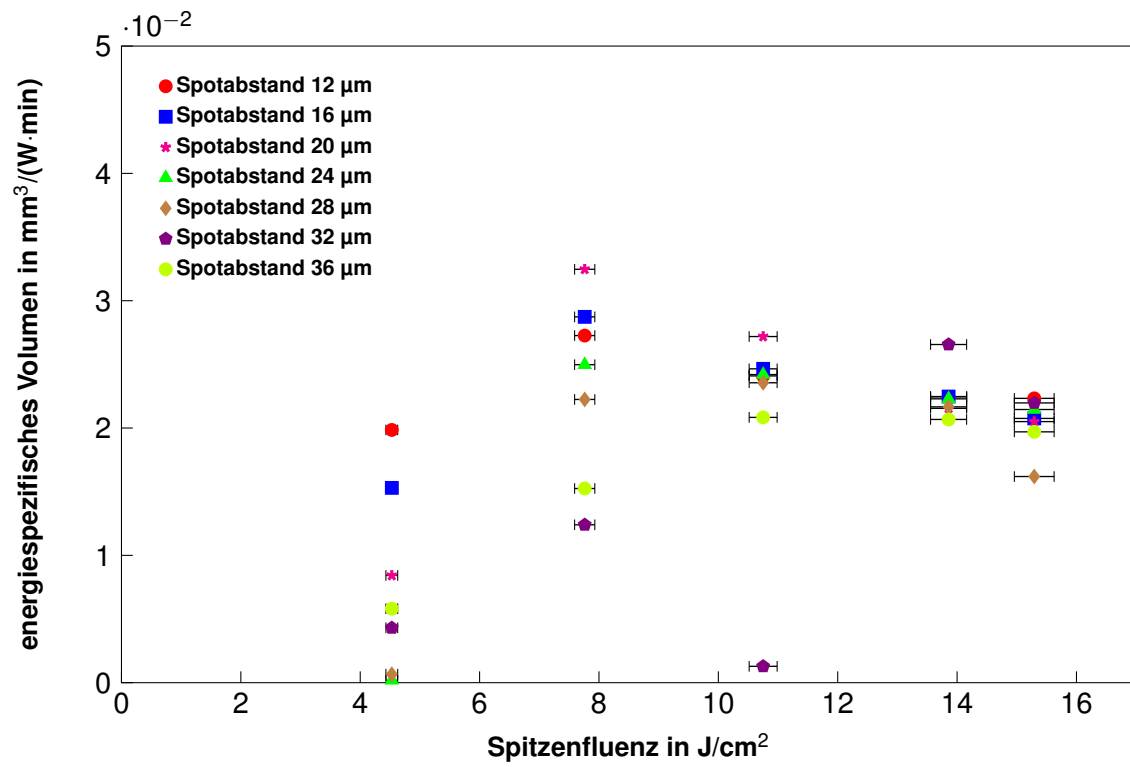


Bild 8.7: Energiespezifisches Volumen über Fluenz für Gold bei Einfachüberfahrten.

Anhang D: REM-Aufnahmen Mehrfachüberfahrten

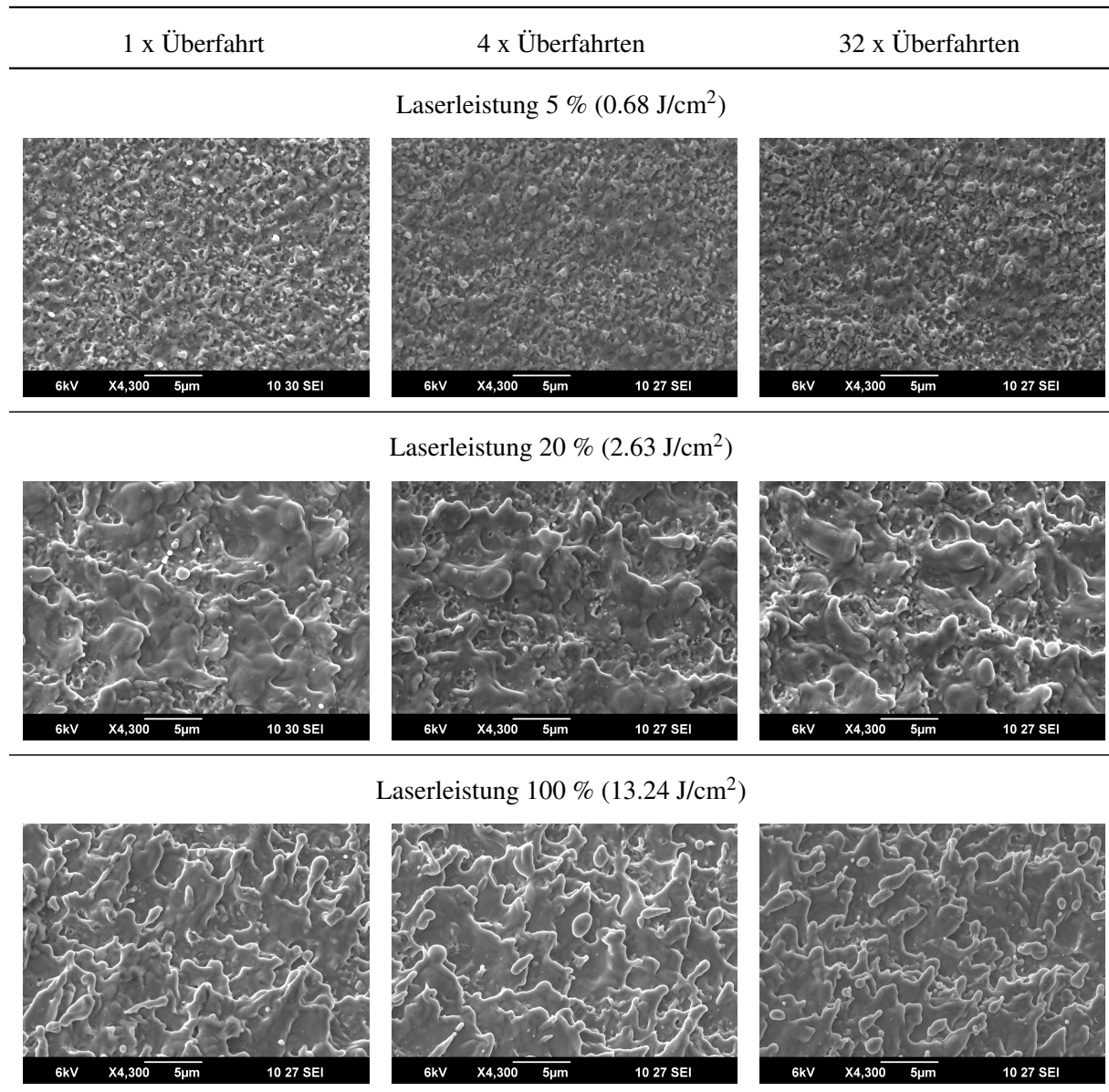


Bild 8.8: REM-Aufnahmen Mehrfachüberfahrten von Aluminium bei 1x, 4x, 32x Überfahrten und 5%, 20%, 100% Laserleistung.

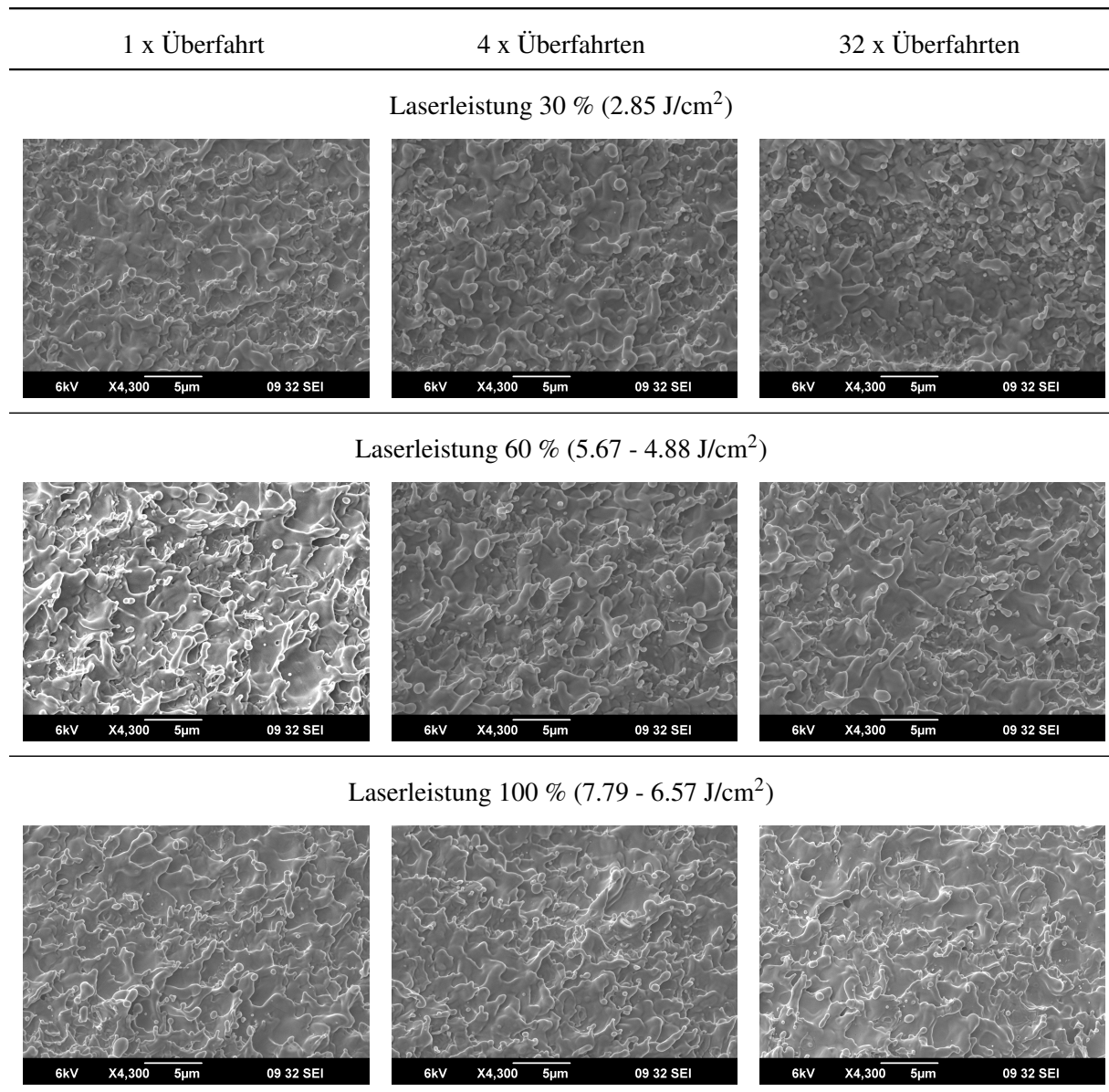


Bild 8.9: REM-Aufnahmen Mehrfachüberfahrten von Kupfer bei 1x, 4x, 32x Überfahrten und 30%, 60%, 100% Laserleistung.

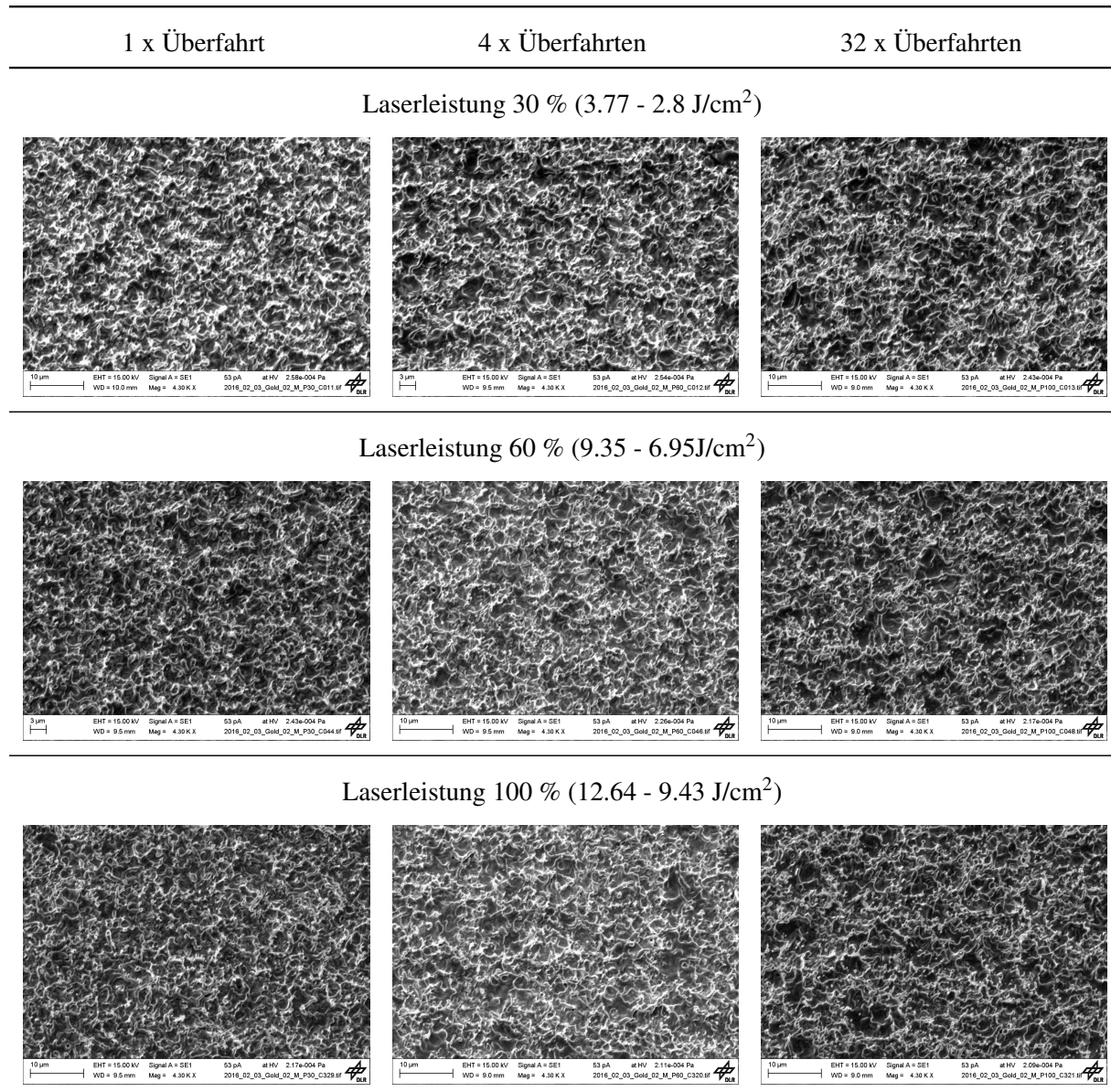


Bild 8.10: REM-Aufnahmen Mehrfachüberfahrten von Gold bei 1x, 4x, 32x Überfahrten und 30%, 60%, 100% Laserleistung.

Anhang E: Energiespezifisches Volumen Mehrfachüberfahrten

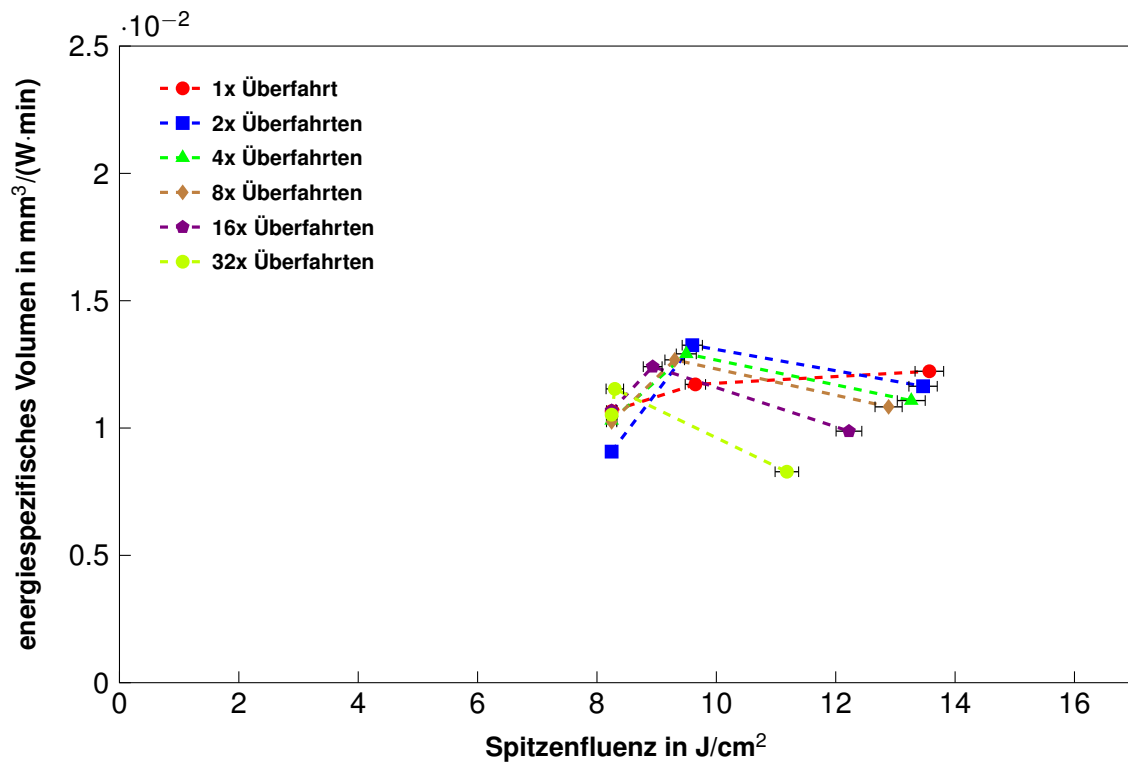


Bild 8.11: Energiespezifisches Volumen über Fluenz für Kupfer bei Mehrfachüberfahrten.

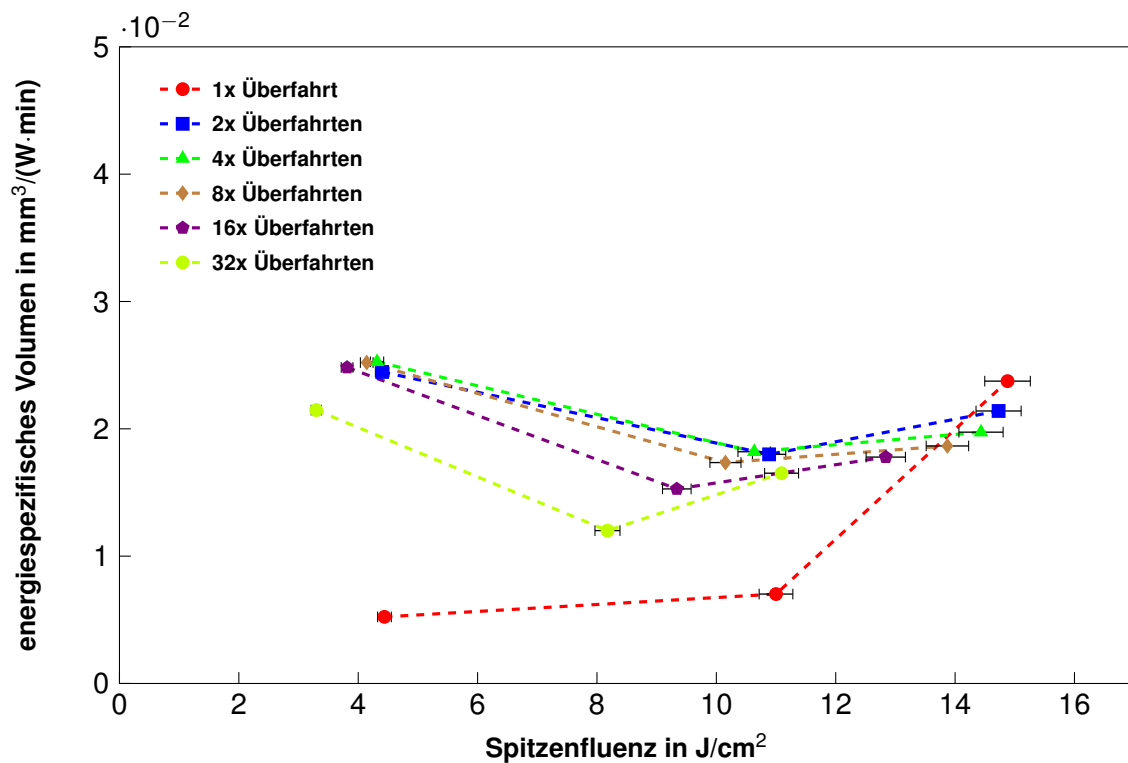


Bild 8.12: Energiespezifisches Volumen über Fluenz für Gold bei Mehrfachüberfahrten.

Anhang F: Makrobefehle

```

1  //
2  // Übermacro
3  //
4
5
6
7
8  // Alle Fenster schließen
9  while (nlimages>0) {
10         selectImage(nlimages);
11         close();
12     }
13
14
15  // Verzeichnisse auswählen
16
17  SourceDirectory = getDirectory("Choose Source Directory ");
18  DestinationDirectory = getDirectory("Choose Destination Directory ");
19  TempDirectory = getDirectory("temp") + "OPD2TIF\\";
20
21
22  CheckDirectory(SourceDirectory);
23
24
25  function CheckDirectory(input_path)
26  {
27         list = getFileList(input_path);
28
29         for (i=0; i<list.length; i++) {
30
31             if (endsWith(list[i], "/"))
32             {
33                 SubFolder = substring(input_path, lengthOf(SourceDirectory));
34
35                 print(DestinationDirectory+SubFolder);
36
37                 if (!File.exists(DestinationDirectory+SubFolder))
38                 {
39                     File.makeDirectory(DestinationDirectory+SubFolder
40                                     );
41
42                     CheckDirectory(input_path+list[i]);
43             }

```

```

44     else if (endsWith(list[i], "opd"))
45     {
46         SubFolder = substring(input_path, lengthOf(SourceDirectory),
47                               lengthOf(input_path)-1);
48         SubFolder = substring(SubFolder, 0, lastIndexOf(SubFolder, "/"
49                                                         )+1);
50
51         print(DestinationDirectory+SubFolder);
52
53         if (!File.exists(DestinationDirectory+SubFolder))
54         {
55             File.makeDirectory(DestinationDirectory+SubFolder
56                                 );
57         }
58         StitchTogether(input_path, DestinationDirectory+SubFolder,
59                        TempDirectory);
60         return;
61     }
62 }
63
64 function StitchTogether(path_from, path_to, path_temp)
65 {
66     if (!File.exists(path_temp))
67     {
68         File.makeDirectory(path_temp);
69     }
70
71     // Weiterführende Macros aufrufen
72
73     runMacro("profiling\\Automation_OPD_to_TIFF.ijm", path_from+"\n"
74             +path_temp);
75     runMacro("profiling\\Ausgleich_Verkipfung.ijm", path_temp);
76     runMacro("profiling\\Stitching_File.ijm", path_temp+"\n"+path_to)
77     ;
78     //runMacro("Stitching_Liu.ijm", path_temp+"\n"+path_to);
79     //runMacro("Roughness_Depth.ijm", path_from+"\n"+path_to);
80
81     // Ordner mit Einzelbildern löschen
82
83     if (endsWith(path_temp, "OPD2TIF\\")){
84         list = getFileList(path_temp);
85         for (i=0; i<list.length; i++) { File.delete(path_temp+list[i]); }
86         File.delete(path_temp);
87     }
88 }

```

```
84 }
85
86 // Alle Fenster schließen
87 close("*");
88     if (isOpen("Results")) {
89         selectWindow("Results");
90         run("Close");
91     }
92     if (isOpen("Console")) {
93         selectWindow("Console");
94         run("Close");
95     }
96     if (isOpen("Surface Characterisation...")) {
97         selectWindow("Surface Characterisation...");
98         run("Close");
99     }
100     if (isOpen("Information file")) {
101         selectWindow("Information file");
102         run("Close");
103     }
```

```

1  //
2  // OPD zu TIFF Konverter
3  //
4
5
6      //Paths = {"", ""};
7
8  //Übergabe Verzeichnis
9
10     if (getArgument() == "")
11     {
12         SourcePath = getDirectory("Choose Source Directory");
13         DestinationPath = getDirectory("Choose Destination Directory");
14     }
15     else
16     {
17         Paths = split(getArgument(), "\n");
18         SourcePath = Paths[0];
19         DestinationPath = Paths[1];
20     }
21
22     list = getFileList(SourcePath);
23     oldBatchMode = is("Batch Mode");
24     setBatchMode(true);
25
26     for (i=0; i<list.length; i++) {
27
28         //print(list[i]);
29         if (endsWith(list[i], "opd"))
30         {
31             showProgress(i+1, list.length);
32             openopd(SourcePath+list[i]);
33
34             saveAs("TIFF", DestinationPath+list[i]);
35             close();
36
37         }
38     }
39
40     setBatchMode(oldBatchMode);
41 ;
42
43 function openopd(path_to_file)
44 {
45
46     // Rohdaten einlesen, Bildgröße definieren, Offset eingeben

```

```

47  print("\\" + path_to_file + "\\");
48      run("Raw...", "open="+ path_to_file + " image=[32-bit Real] width=480
        height=640 offset=6008 number=1 gap=0 little-endian");
49
50  // Pixelgröße definieren
51
52      run("Properties...", "channels=1 slices=1 frames=1 unit=m pixel_width
        =0.36179 pixel_height=0.36179 voxel_depth=1.0000000");
53
54  /* // Bild zuschneiden
55
56      run("Specify...", "width=475 height=625 x=2 y=10");
57
58      run("Crop");
59  */
60  // Bild drehen
61
62      run("Rotate 90 Degrees Left");
63
64  // Schwellwert definieren, fehlende Bilddaten entfernen
65
66      run("Select All");
67      setThreshold(-100000000000.0000, 100000000000.0000);
68      run("NaN Background", "stack");
69
70      for(i=0; i<10 ; i++)
71      {
72          run("Remove NaNs...", "radius=10 stack");
73      }
74
75
76  // Skalierungsfaktor definieren
77
78      run("Multiply...", "value=0.07262164");
79      resetMinAndMax();
80
81  }

```



```

1  //
2  //Ausgleich der Verkippung der Einzelbilder vor Stitching
3  //
4
5      InputPath = "";
6  //Übergabe Verzeichnis
7      InputPath = getArgument();
8
9
10     if (InputPath == "")
11     {
12         InputPath = getDirectory("Choose Source Directory");
13     }
14     else
15     {
16         //    dir = InputPath;
17     }
18
19
20     oldBatchMode = is("Batch Mode");
21     setBatchMode(true);
22
23     //Bilder als Stack öffnen, Verzeichnis und ImageID bestimmen
24     run("Image Sequence...", "open=&InputPath sort");
25     ImagePath = getDirectory("image");
26     StackID = getImageID();
27
28     //Einzelbild aus Stack auswählen, kopieren und ImageID bestimmen
29
30     minSlice = 1;
31     setSlice(1);
32     getStatistics(area, mean, min, max, minStd, histogram);
33
34     for(i = 2; i <= nSlices; i++)
35     {
36         setSlice(i);
37         getStatistics(area, mean, min, max, std, histogram);
38         if(std < minStd)
39         {
40             minStd = std;
41             minSlice = i;
42         }
43     }
44
45     setSlice(minSlice);
46     //    print(minSlice);

```

```
47
48     run("Duplicate ...", " ");
49     SliceID = getImageID();
50
51 // Filter
52     run("Median ...", "radius=10");
53     run("Fit Polynomial", "x=1 y=1 mixed=0 output");
54
55 // Verkipfung von Stack subtrahieren
56     imageCalculator("Subtract stack", StackID, SliceID);
57
58 // Einzelbild auswählen und schließen
59     selectImage(SliceID);
60     close();
61
62 // Alle Bilder des Stack als Einzelbilder speichern
63     selectImage(StackID);
64     run("Image Sequence ...", "format=TIFF name=Dummy use save=["+
        ImagePath+"Dummy0000.tif]");
65     close();
66
67     setBatchMode(oldBatchMode);
```

```

1  //
2  //Stitching
3  //
4
5  //Übergabe Verzeichnis
6
7  if (getArgument() == "")
8  {
9      SourcePath = getDirectory("Choose Source Directory");
10     DestinationPath = getDirectory("Choose Destination Directory");
11 }
12 else
13 {
14     Paths = split(getArgument(), "\n");
15     SourcePath = Paths[0];
16     DestinationPath = Paths[1];
17 }
18 //Dateiname für Stitching anpassen: "N(ii).tif"
19 ImageName = "";
20 FinallImage = "";
21
22 list = getFileList(SourcePath);
23
24 for (i=0; i<list.length; i++) {
25     if (endsWith(list[i], ".tif")){
26         cut = lastIndexOf(list[i], "N");
27         ImageName = substring(list[i], 0, cut) + "N{ii}.tif";
28         FinallImage = substring(list[i], 0, cut) + ".tif";
29
30
31         //Skaliierungsfaktoren ermitteln
32
33
34         open(SourcePath+list[i]);
35         getVoxelSize(dx, dy, dz, unit);
36         run("Close");
37
38         break;
39     }
40 }
41
42 // Stitching mit Datei
43
44 Koordinaten = File.openAsString("C:\\fiji-win64\\Fiji.app\\macros\\
    profiling\\TileConfigurationMasterTemplate.txt");
45 print(Koordinaten);

```

```

46
47 list = getFileList(SourcePath);
48 //list = getFileList("C:\\Users\\past_ja\\AppData\\Local\\Temp\\OPD2TIF")
    ;
49
50
51 first_file_index = indexOf(Koordinaten, ".tif");
52 Koordinaten_substring = substring(Koordinaten, 0, first_file_index);
53 print(Koordinaten_substring);
54
55 first_file_index = lastIndexOf(Koordinaten_substring, "N");
56 Koordinaten_substring = substring(Koordinaten_substring, 0,
    first_file_index);
57 print(Koordinaten_substring);
58
59 list_Korrdinates = split(Koordinaten_substring);
60 Oldname = list_Korrdinates[list_Korrdinates.length-1];
61 print(Oldname);
62
63
64     for (i=0; i<list.length; i++)
65     {
66         if (endsWith(list[i], ".tif"))
67         {
68             Cut = lastIndexOf(list[i], "N");
69             print(Cut);
70             Newname = substring(list[i], 0, Cut);
71             print(Newname);
72             Koordinaten = replace(Koordinaten, Oldname, Newname);
73             break;
74         }
75     }
76
77 //print(Koordinaten);
78
79 //File.saveString(Koordinaten, "C:\\Users\\past_ja\\AppData\\Local\\Temp
    \\OPD2TIF\\" + "TileConfiguration.txt");
80
81 File.saveString(Koordinaten, SourcePath + "\\TileConfiguration.txt");
82
83 run("Grid/Collection stitching", "type=[Positions from file] order=[
    Defined by TileConfiguration] directory=&SourcePath layout_file=
    TileConfiguration.txt fusion_method=[Linear Blending]
    regression_threshold=0.30 max/avg_displacement_threshold=2.50
    absolute_displacement_threshold=3.50 compute_overlap ignore_z_stage
    computation_parameters=[Save memory (but be slower)] image_output=[

```

```

        Fuse and display]);
84  /*
85  // Stitching
86
87      run("Grid/Collection stitching", "type=[Grid: row-by-row] order=[
        Right & Up] grid_size_x=7 grid_size_y=9 tile_overlap=18
        first_file_index_i=1 directory=&SourcePath file_names=&
        ImageName output_textfile_name=TileConfiguration.txt
        fusion_method=[Linear Blending] regression_threshold=0.30 max/
        avg_displacement_threshold=2.50
        absolute_displacement_threshold=3.50 compute_overlap
        ignore_z_stage subpixel_accuracy computation_parameters=[Save
        memory (but be slower)] image_output=[Fuse and display]");
88
89
90  if (nImages == 0){
91      run("Grid/Collection stitching", "type=[Grid: row-by-row] order=[
        Right & Up] grid_size_x=7 grid_size_y=9 tile_overlap=18
        first_file_index_i=1 directory=&SourcePath file_names=&
        ImageName output_textfile_name=TileConfiguration.txt
        fusion_method=[Linear Blending] regression_threshold=0.30 max/
        avg_displacement_threshold=2.50
        absolute_displacement_threshold=3.50 ignore_z_stage
        subpixel_accuracy computation_parameters=[Save memory (but be
        slower)] image_output=[Fuse and display]");
92  }
93
94  if (nImages > 0){
95      setVoxelSize(dx, dy, dz, unit);
96  }
97  */
98
99  // Ausgleich der Verkipfung
100
101  // ROI Manager leeren
102
103      for (;0<roiManager("count");){
104          roiManager("Select", 0);
105          roiManager("Delete");
106      }
107
108      makeRectangle(5, 5, 250, 250);
109      run("ROI Manager...");
110      roiManager("Add");
111      makeRectangle(3695, 5, 250, 250);
112      run("ROI Manager...");

```

```

113     roiManager("Add");
114     makeRectangle(5, 3545, 250, 250);
115     run("ROI Manager...");
116     roiManager("Add");
117     run("Set Measurements...", "mean redirect=None decimal=9");
118     roiManager("Multi Measure");
119
120     m_lo = getResult("Mean1", 0);
121     m_ro = getResult("Mean2", 0);
122     m_lu = getResult("Mean3", 0);
123     run("Select All");
124
125     run("Macro...", "code=[v = v + " + (m_lo-m_ro) + "*x/w + " + (
        m_lo-m_lu) + "*y/h + " + (0-m_lo) + "]"");
126
127
128     // Ergebnis speichern und auf definierte Größe zuschneiden
129
130     if ((getArgument() != "") && (nlimages > 0))
131     {
132         run("Canvas Size...", "width=3950 height=3800 position=Center");
133         //Muss noch automatisch angepasst werden.
134         setVoxelSize(dx, dy, dz, unit);
135         saveAs("Tiff", DestinationPath + Finallmage);
136         close();
137     }
138     else {
139         selectWindow("Log");
140         saveAs("Text", DestinationPath + "Error_" + Finallmage);
141     }
142
143     /* Stitching per Koordinaten in Datei
144     // Änder der Namen für Stitching per Datei
145
146     Koordinaten = File.openAsString("C:\\ fiji-win64\\ Fiji.app\\macros\\
        TileConfiguration.MasterTemplate.txt");
147
148     list = getFileList(SourcePath);
149
150     for (i=0; i<list.length; i++)
151     {
152         if (endsWith(list[i], ".tif"))
153         {
154             Newname = list[i];
155             //Newname = substring(list[i],0);

```

```

156         print(Newname);
157         Cut = lastIndexOf(list[i], "N");
158         print(Cut);
159         Oldname = substring(list[i], Cut);
160         print(Oldname);
161         Koordinaten = replace(Koordinaten, Oldname, Newname);
162     }
163 }
164
165 File.saveString(Koordinaten, SourcePath + "TileConfiguration.txt");
166
167 run("Grid/Collection stitching", "type=[Positions from file] order=[
    Defined by TileConfiguration] directory=&SourcePath layout_file=
    TileConfiguration.txt fusion_method=[Linear Blending]
    regression_threshold=0.30 max/avg_displacement_threshold=2.50
    absolute_displacement_threshold=3.50 ignore_z_stage
    computation_parameters=[Save memory (but be slower)] image_output=[
    Fuse and display]");
168 */

```

[illegible]


```

44
45         // print ( DestinationDirectory+SubFolder );
46
47         if (! File . exists ( DestinationDirectory+SubFolder ))
48             {
49                 File . makeDirectory ( DestinationDirectory+SubFolder
50                                     );
51             }
52         SurfaceMeasurement(input_path , DestinationDirectory+SubFolder)
53         ;
54         return ;
55     }
56
57 function SurfaceMeasurement(path_from , path_to)
58 {
59     if (! File . exists (path_to))
60     {
61         File . makeDirectory (path_to) ;
62     }
63
64     // Weiterführende Macros aufrufen
65
66     runMacro ( " profiling \\ Roughness_Depth . ijm " , path_from+"\\n"+path_to
67             );
68
69     // Alle Fenster schließen
70     close ( "*" );
71     if ( isOpen ( "Results" )) {
72         selectWindow ( "Results" );
73         run ( "Close" );
74     }
75     if ( isOpen ( "Console" )) {
76         selectWindow ( "Console" );
77         run ( "Close" );
78     }
79     if ( isOpen ( "Surface Characterisation ..." )) {
80         selectWindow ( "Surface Characterisation ..." );
81         run ( "Close" );
82     }
83     if ( isOpen ( "Information file" )) {
84         selectWindow ( "Information file" );
85         run ( "Close" );
86     }

```

```

1  //
2  // Oberflächenanalyse
3  //
4
5  //Übergabe Verzeichnis
6
7  if (getArgument() == "")
8  {
9      SourcePath = getDirectory("Choose Source Directory");
10     DestinationPath = getDirectory("Choose Destination Directory");
11 }
12 else
13 {
14     Paths = split(getArgument(), "\n");
15     SourcePath = Paths[0];
16     DestinationPath = Paths[1];
17 }
18
19     oldBatchMode = is("Batch Mode");
20     setBatchMode(true);
21
22 //Bilder als Stack öffnen, Verzeichnis und ImageID bestimmen
23
24     run("Image Sequence...", "open=&SourcePath sort");
25
26 //Oberfläche auf "0" setzten – Mode ermitteln und subtrahieren
27
28     run("Set Measurements...", "modal redirect=None decimal=9");
29     run("Select All");
30     run("ROI Manager...");
31     roiManager("Add");
32     roiManager("Select", 0);
33     roiManager("Multi Measure");
34     for (i=0; i<nResults; i++)
35     {
36         setSlice(i+1);
37         moderesult = getResult("Model", i);
38         //print(moderesult);
39         run("Subtract...", "value=&moderesult slice");
40     }
41
42 // ROI definieren
43
44     run("Specify...", "width=2000 height=2000 x=1750 y=2150 slice=1
45         centered");
46     roiManager("Add");

```

```

46         //run("Specify...", "width=3300 height=3300 x=1948 y=1932 slice=1
           centered");
47         //run("Make Inverse");
48         //roiManager("Add");
49
50
51     // Messgrößen definieren, messen und abspeichern
52
53         run("Set Measurements...", "mean standard min median stack
           display redirect=None decimal=9");
54         roiManager("Select", 1);
55         roiManager("Multi Measure");
56
57     // Label umbenennen
58
59     for (i=0; i<nResults; i++)
60     {
61         setSlice(i+1);
62         setResult("Label", i, getInfo("slice.label"));
63     }
64     name1 = File.getName(SourcePath);
65     filename1 = name1 + "_Surface_Results.xls";
66     saveAs("Results", DestinationPath + filename1);
67
68     // Oberflächenanalyse Plugin aufrufen, messen und abspeichern
69
70         roiManager("Select", 1);
71         run("Crop");
72         run("SurfCharJ 1qEd", "Process entire stack");
73     //Plugin wurde im Quellcode verändert, so dass Checkbox "Level Surface"
       und "Process entire stack" von anfang an gewählt sind
74
75     // Speichern
76
77         selectWindow("Surface Characterisation...");
78         name2 = File.getName(SourcePath);
79         filename2 = name2 + "_Surface_Characterisation.xls";
80         saveAs("Text", DestinationPath + filename2);
81         setBatchMode(oldBatchMode);

```

```

1  //
2  // Übermacro für Volumenanalyse
3  //
4
5
6
7
8  // Alle Fenster schließen
9  while (nlimages>0) {
10         selectImage(nlimages);
11         close();
12     }
13
14
15  // Verzeichnisse auswählen
16
17  SourceDirectory = getDirectory("Choose Source Directory ");
18  DestinationDirectory = getDirectory("Choose Destination Directory ");
19
20
21  CheckDirectory(SourceDirectory);
22
23
24  function CheckDirectory(input_path)
25  {
26         list = getFileList(input_path);
27
28         for (i=0; i<list.length; i++) {
29
30             if (endsWith(list[i], "/"))
31             {
32                 SubFolder = substring(input_path, lengthOf(SourceDirectory));
33
34                 //print(DestinationDirectory+SubFolder);
35
36                 if (!File.exists(DestinationDirectory+SubFolder))
37                 {
38                     File.makeDirectory(DestinationDirectory+SubFolder);
39                 }
40
41                 CheckDirectory(input_path+list[i]);
42             }
43             else if (endsWith(list[i], ".tif"))
44             {
45                 SubFolder = substring(input_path, lengthOf(SourceDirectory),

```

```

        lengthOf(input_path)-1);
46     SubFolder = substring(SubFolder, 0, lastIndexOf(SubFolder, "/"
        )+1);
47
48     //print(DestinationDirectory+SubFolder);
49
50     if(!File.exists(DestinationDirectory+SubFolder))
51     {
52         File.makeDirectory(DestinationDirectory+SubFolder
53             );
54     }
55     VoluminaMeasurement(input_path, DestinationDirectory+SubFolder
56         );
57     return;
58 }
59
60 function VoluminaMeasurement(path_from, path_to)
61 {
62
63     // Weiterführende Macros aufrufen
64
65     runMacro("profiling \\Volumen.ijm", path_from+"\n"+path_to);
66
67 }
68
69 // Alle Fenster schließen
70 close("*");
71 if (isOpen("Results")) {
72     selectWindow("Results");
73     run("Close");
74 }
75 if (isOpen("Console")) {
76     selectWindow("Console");
77     run("Close");
78 }
79 if (isOpen("Surface Characterisation...")) {
80     selectWindow("Surface Characterisation...");
81     run("Close");
82 }
83 if (isOpen("Information file")) {
84     selectWindow("Information file");
85     run("Close");
86 }

```

```

1  //
2  //Volumen bestimmen
3  //
4
5  //Übergabe Verzeichnis
6
7  if (getArgument() == "")
8  {
9      SourcePath = getDirectory("Choose Source Directory");
10     DestinationPath = getDirectory("Choose Destination Directory");
11 }
12 else
13 {
14     Paths = split(getArgument(), "\n");
15     SourcePath = Paths[0];
16     DestinationPath = Paths[1];
17 }
18     list = getFileList(SourcePath);
19     oldBatchMode = is("Batch Mode");
20 //     setBatchMode(true);
21
22
23 //Bilder als Stack öffnen, Verzeichnis und ImageID bestimmen
24
25     run("Image Sequence...", "open=&SourcePath sort" );
26
27 //Oberfläche auf "0" setzten – Mode ermitteln und subtrahieren
28     run("Set Measurements...", "modal redirect=None decimal=9");
29     run("Select All");
30     run("ROI Manager...");
31     roiManager("Add");
32     roiManager("Select", 0);
33     roiManager("Multi Measure");
34
35     for (i=0; i<nResults; i++)
36     {
37         setSlice(i+1);
38         moderesult = getResult("Mode1", i);
39         run("Subtract...", "value=&moderesult slice");
40     }
41
42 // Threshold setzen,
43
44     setThreshold(-1e10, -0.2);
45
46 // ROI Manager leeren

```

```

47
48     for (;0<roiManager("count");){
49         roiManager("Select", 0);
50         roiManager("Delete");
51     }
52
53 // Masken erstellen
54     run("Make Binary", "method=Default background=Default");
55
56     for (i=0; i<nSlices; i++)
57     {
58         setSlice(i+1);
59         run("Maximum...", "radius=20");
60         run("Minimum...", "radius=20");
61         run("Analyze Particles...", "size=200000-Infinity exclude include
           add");
62     }
63
64     close();
65
66 // Stack nochmals öffnen um Masken über jeweiligen Slice zu legen
67
68     run("Image Sequence...", "open=&SourcePath sort");
69
70     for (i=0; i<nResults; i++)
71     {
72         setSlice(i+1);
73         moderesult = getResult("Mode1", i);
74         run("Subtract...", "value=&moderesult slice");
75     }
76
77 // Messen: Area und Mean
78
79     run("Set Measurements...", "area mean stack display redirect=None
           decimal=9");
80     roiManager("Show None");
81     roiManager("Select", 0);
82     roiManager("Select All");
83
84     name = File.getName(SourcePath);
85     filename = name + "_Roi.zip";
86
87     roiManager("Save", DestinationPath + filename);
88     roiManager("Measure");
89
90 // Label umbenennen

```

```
91
92  for (i=0; i<nResults; i++)
93  {
94      //setSlice(i+1);
95      // setResult("Label", i, getInfo("slice.label"));
96
97  // Volumen berechnen
98
99      areareult = getResult("Area", i);
100      meanresult = getResult("Mean", i);
101      volumenresult = abs(areareult * meanresult);
102      setResult("Volumen",i, volumenresult);
103  }
104
105  // Speichern
106
107      name = File.getName(SourcePath);
108      filename = name + "_Volumen_Results.xls";
109      saveAs("Results", DestinationPath + filename);
110
111      setBatchMode(oldBatchMode);
```



```

1  //
2  // Übermacro für FFT
3  //
4
5
6
7
8  // Alle Fenster schließen
9  while (nlimages>0) {
10      selectImage(nlimages);
11      close();
12  }
13
14
15  // Verzeichnisse auswählen
16
17  SourceDirectory = getDirectory("Choose Source Directory ");
18  DestinationDirectory = getDirectory("Choose Destination Directory ");
19
20
21  CheckDirectory(SourceDirectory);
22
23
24  function CheckDirectory(input_path)
25  {
26      list = getFileList(input_path);
27
28      for (i=0; i<list.length; i++) {
29
30          if (endsWith(list[i], "/"))
31          {
32              SubFolder = substring(input_path, lengthOf(SourceDirectory));
33
34              print(DestinationDirectory+SubFolder);
35
36              if (!File.exists(DestinationDirectory+SubFolder))
37              {
38                  File.makeDirectory(DestinationDirectory+SubFolder);
39              }
40
41              CheckDirectory(input_path+list[i]);
42          }
43          else if (endsWith(list[i], ".tif"))
44          {
45              SubFolder = substring(input_path, lengthOf(SourceDirectory),

```

```

lengthOf(input_path)-1);
46 SubFolder = substring(SubFolder, 0, lastIndexOf(SubFolder, "/"
    )+1);
47
48 print(DestinationDirectory+SubFolder);
49
50 if(!File.exists(DestinationDirectory+SubFolder))
51 {
52     File.makeDirectory(DestinationDirectory+SubFolder
53         );
54 }
55 FFTMeasurement(input_path, DestinationDirectory+SubFolder);
56 return;
57 }
58 }
59
60 function FFTMeasurement(path_from, path_to)
61 {
62
63     // Weiterführende Macros aufrufen
64
65     runMacro("profiling\\FFT.ijm", path_from+"\n"+path_to);
66
67 }
68
69 // Alle Fenster schließen
70 close("*");
71 if (isOpen("Results")) {
72     selectWindow("Results");
73     run("Close");
74 }
75 if (isOpen("Console")) {
76     selectWindow("Console");
77     run("Close");
78 }
79 if (isOpen("Surface Characterisation...")) {
80     selectWindow("Surface Characterisation...");
81     run("Close");
82 }
83 if (isOpen("Information file")) {
84     selectWindow("Information file");
85     run("Close");
86 }

```

```

1  //
2  //FFT Analyse
3  //
4
5  //Übergabe Verzeichnis
6
7  if (getArgument() == "")
8  {
9      SourcePath = getDirectory("Choose Source Directory");
10     DestinationPath = getDirectory("Choose Destination Directory");
11 }
12 else
13 {
14     Paths = split(getArgument(), "\n");
15     SourcePath = Paths[0];
16     DestinationPath = Paths[1];
17 }
18     list = getFileList(SourcePath);
19     //print(SourcePath);
20     run("Clear Results");
21     //oldBatchMode = is("Batch Mode");
22     //setBatchMode(true);
23
24 for (j = 0; j < list.length; j++) {
25
26     if (endsWith(list[j], ".tif"))
27     {
28         open(list[j]);
29         imagename = getInfo("image.filename");
30         closeid = getImageID();
31         showProgress(j+1, list.length);
32         run("Specify ...", "width=2000 height=2000 x=1750 y=2150 slice=1
           centered");
33         getStatistics(area, mean, min, max, std, histogram);
34         run("Subtract ...", "value="+ mean);
35         run("FFT Options ...", "raw");
36         run("FFT");
37         closeidfft = getImageID();
38         run("Radial Profile Angle", "x_center=" + (getWidth()/2) + "
           y_center=" + (getHeight()/2) + " radius=" + (sqrt(1/2)*
           getWidth()+1) + " starting_angle=0 integration_angle=180");
39
40         for (i = 0; i < Ext.getBinSize; i++)
41         {
42             setResult("Radius", i, Ext.getXValue(i));
43             setResult(imagename, i, Ext.getYValue(0,i));

```

```
44         }
45     close () ;
46     selectImage (closeid) ;
47     close () ;
48     selectImage (closeidfft) ;
49     close () ;
50     }
51 }
52
53 updateResults () ;
54
55 // Speichern
56
57     selectWindow ("Results") ;
58     name = File .getName (SourcePath) ;
59     filename = name + "_FFT_Results.xls" ;
60     saveAs ("Results", DestinationPath + filename) ;
61
62     //setBatchMode (oldBatchMode) ;
```

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt haben.

Allen voran danke ich Herrn Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Herrn Dr. phil. nat. Rudolf Weber und Herrn Dr. rer. nat. Hans-Albert Eckel die mir diese Arbeit ermöglicht haben.

Einen besonderen Dank gebührt meinen Betreuern Dr. rer. nat. Raoul-Amadeus Lorbeer und Daniel Förster für die ausgiebige Unterstützung und Geduld bei der Erstellung dieser Arbeit.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei allen Mitarbeitern der Abteilung Studien und Konzepte des Institutes für Technische Physik und des Instituts für Strahlwerkzeuge für die stets kollegiale Zusammenarbeit und fachliche Unterstützung.

Meinen Freunden Michelle Freyer und Sebastian Fahrbach danke ich für das Korrekturlesen und die aufgebrauchte Zeit, besonders in der stressigen Endphase der Arbeit.

Einen Dank für die alltägliche Unterstützung während der gesamten Studienzeit gebührt meiner Freundin Theresa Musche.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Christine und Jürgen Pastow bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben.

Stuttgart, 1. März 2016